



TITLE:

海上交通流の解析と航路計画の方法論に関する研究( Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

喜多, 秀行

---

CITATION:

喜多, 秀行. 海上交通流の解析と航路計画の方法論に関する研究. 京都大学, 1986, 工学博士

ISSUE DATE:

1986-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5791>

RIGHT:

海上交通流の解析と  
航路計画の方法論に関する研究

昭和60年8月

喜 多 秀 行

# 海上交通流の解析と 航路計画の方法論に関する研究

昭和60年8月

喜 多 秀 行

# 正誤表

頁	行	誤	正
11	10	速度	速度(m/min)
"	"	船舶長(垂線間長)	船舶長(垂線間長,m)
12	21	G T がトン	G T が 100トン
31	式(3.17)	$dV_k dV_k$	$dV_k \cdot dV_k$
47	表3-5	0.399	0.999
51	14	船の直径	船の衝突直径
57	29	図4-2	図4-3
59	6	図3-2	図2-1
68	式(4.17)	$x_1 + r_{a2}$	$x_1(t_4) + r_{a2}$
"	式(4.20)	$\cos \theta$	$\sin \theta$
"	"	$\sin \theta$	$\cos \theta$
69	式(4.21)	$\cos$	$\sin \theta$
"	"	$\sin \theta$	$\cos \theta$
"	8	(2.23)	(4.23)
130	17	Lloyds	Lloyd's
"	18	Underwriters	Underwriters'
147	19	積荷重量トン	載荷重量トン
"	20	積荷重量トン	載荷重量トン

## 序

交通混雑が恒常的となっていてすでに久しい。日常生活に身近でないために話題に上ることは多くないが、主要航路における船舶の輻輳も看過できない状態となっている。

安全で円滑な交通を実現するため、これまでも幾多の努力がなされてきたが、とりわけ、道路交通工学に関しては精力的な研究が各国で進められ、ここで得られた数多くの成果が道路の計画や設計に生かされている。しかるに、航路の計画や設計も同様かと問えば、必ずしもそうであるとは言えない。これは、海上交通が、安全性確保の面からの要請が極めて高い交通であることに加えて、交通挙動が道路交通に比して多様性に富んでいるため、計画・設計の拠りどころとなる交通現象の理解と、これを航路計画に生かすための方法論が十分でなかったところに原因がある。そのため、従来の航路計画は関係者間の協議に基づく経験工学的色彩が強く、現象解析を基礎とする部分についても、船舶の挙動を交通流挙動としてとらえているわけではなかった。

本研究は、交通の望ましさという視点から、従来の航路計画に欠けていた考え方を提示し、併せて、そのための現象分析と予測手法を開発することを目的としている。その際、航路上を航行する船舶の挙動を“流れ”としてとらえ、その流れ方の望ましさが計画の評価に直接反映されるような計画方法論を構築するというのが研究の基本的態度である。実際の計画への適用にあたり、さらに検討を加えるべき問題も少なからず残されているが、航路計画をより一層合理性に裏付けられたものとし、航路計画者と航路利用者の間によりよき航路の姿を探るための共通の言葉を提供するという当初の意図は、ある程度達成できたのではないかと考えている。本研究が、海上交通工学と航路計画法の発展にいささかなりとも寄与しうるならば望外の喜びである。

昭和60年 8月

喜 多 秀 行

# 目 次

第 1 章	序 論 .....	1
第 I 編 航路における海上交通流解析に関する研究		
第 2 章	海上交通流の特徴と統計的性質 .....	5
2-1	概 説 .....	5
2-2	海上交通流の特性 .....	5
2-3	方位角分布 .....	9
2-4	避航開始距離分布 .....	10
2-4-1	同航・反航船舶に対する避航開始距離分布 .....	10
2-4-2	交差船舶に対する避航開始距離分布 .....	12
2-4-3	橋脚に対する避航開始距離分布 .....	12
2-5	避航船舶の航過距離分布 .....	13
2-6	その他の船舶交通流特性 .....	18
2-6-1	船型構成分布 .....	18
2-6-2	航行位置分布 .....	18
2-6-3	速度分布 .....	18
2-6-4	到着時間間隔分布 .....	19
2-6-5	船舶諸元相互の関係 .....	19
2-7	結 語 .....	20
第 3 章	航路における船舶衝突確率の推定 .....	22
3-1	概 説 .....	22
3-2	衝突確率に影響を及ぼす要因 .....	22
3-3	船舶衝突確率の推定を扱った従来の研究 .....	23
3-4	単路部における船舶衝突確率推定モデル .....	24
3-4-1	モデルにおける推定プロセス .....	24
3-4-2	モデルの前提と避航動態のモデル化 .....	24
3-4-3	基本衝突確率 .....	26
3-4-4	出会い状態の隻数分布 .....	28
3-4-5	航路における衝突危険度 .....	30
3-5	交差部における船舶衝突確率推定モデル .....	31

3-5-1	モデルの前提と避航動態のモデル化	31
3-5-2	出会い隻数とその確率	33
3-5-3	避航失敗確率	35
3-5-4	航路交差部における衝突危険度	36
3-6	航路横断橋への船舶衝突確率推定モデル	38
3-6-1	対象航路と推定プロセス	38
3-6-2	基本衝突確率	39
3-6-3	橋脚への船舶衝突危険度と期待衝突事故件数	42
3-7	モデルの現象説明力に関する検討	42
3-7-1	単路部における船舶衝突確率推定モデルに対する検討	42
3-7-2	交差部における船舶衝突確率推定モデルに対する検討	45
3-7-3	航路横断橋脚への船舶衝突確率推定モデルに対する検討	47
3-7-4	提案したモデルに関する若干の議論	48
3-8	結 語	49
第 4 章	衝突危険度に着目した避航領域の同定	52
4-1	概 説	52
4-2	避航領域の記述形式に関する考察	53
4-2-1	避航領域の記述形式が具備すべき要件	53
4-2-2	船舶を取りまく領域に関する従来の研究	54
4-3	操船者の意思決定と避航領域	56
4-3-1	本研究における避航領域の考え方	56
4-3-2	操船者の意思決定に影響する要因と行動決定基準	57
4-4	同航時側方避航領域のモデル化	58
4-4-1	モデル化の方針と操船者が抱く衝突危険度	58
4-4-2	衝突危険度の算定と衝突危険領域	61
4-4-3	避航コースの選択	65
4-4-4	非集計避航領域の集計化	69
4-4-5	簡単な数値計算例	70
4-5	モデルの妥当性の検討	70
4-5-1	避航領域の直接観測の困難性	70
4-5-2	避航領域に基づく航過距離分布の誘導	71
4-5-3	検証データの概要	75
4-5-4	結果の比較と考察	75
4-6	結 語	77

## 第Ⅱ編 航路の計画・設計・管理の方法論に関する研究

第 5 章	航路計画の方法論に関する一般的考察 .....	81
5-1	概 説 .....	81
5-2	航路計画の基本的考え方 .....	82
5-2-1	航路計画の基本要素 .....	82
5-2-2	航路計画の目的と航路が有すべき機能 .....	82
5-2-3	航路計画の計画領域 .....	84
5-2-4	航路計画の計画主体と評価主体 .....	86
5-3	従来の航路計画の方法論 .....	87
5-3-1	航路計画策定のフロー .....	87
5-3-2	航路の諸元 .....	87
5-3-3	従来の方法論に対する若干の議論 .....	93
5-4	本研究で提案する航路計画の考え方 .....	95
5-4-1	航路の機能が発揮されている度合を定量的に考慮した航路計画 .....	95
5-4-2	航路計画の望ましさに対する総合的な評価 .....	96
5-4-3	リスクが存在するシステムの分析と計画 .....	97
5-4-4	計画対象交通流の概念 .....	98
5-4-5	航行規制を考慮にいたした航路計画 .....	100
5-5	航路計画の方法論に関する基本的枠組み .....	101
5-5-1	システム同定 .....	101
5-5-2	リスクの同定システム .....	101
5-5-3	危険発生確率の推定システム .....	104
5-5-4	リスクの価値評価システム .....	106
5-5-5	航行時間推定システム .....	106
5-5-6	航行時間の価値推定システム .....	106
5-5-7	リスクの評価システム .....	107
5-6	結 語 .....	110
第 6 章	船舶衝突事故率による航路整備と航行規制の評価 .....	114
6-1	概 説 .....	114
6-2	航路整備が航行安全性に及ぼす影響 .....	114
6-2-1	航路の拡幅 .....	114
6-2-2	航路中央分離表示の設置 .....	116
6-2-3	航路中央分離表示の変移 .....	116
6-2-4	航路交差角の変更 .....	118
6-2-5	横断橋橋脚までの緩衝帯の設置 .....	118



6-3	航行規制が航行安全性に及ぼす影響 .....	119
6-3-1	交通特性と衝突確率との関係 .....	119
6-3-2	時間交通量の制限 .....	123
6-3-3	最高速度の制限 .....	123
6-3-4	最大船型の規制 .....	124
6-4	結 語 .....	126
第 7 章	航路における船舶衝突事故損失の評価 .....	129
7-1	概 説 .....	129
7-2	事故損害額に関する従来の研究 .....	130
7-3	衝突事故損害額を構成する費用項目 .....	131
7-4	事故船舶に係わる直接損害の推定 .....	133
7-5	結 語 .....	134
第 8 章	航行シミュレーション・モデルを用いた航路における混雑費用の評価 .....	136
8-1	概 説 .....	136
8-2	航路における混雑費用を扱った従来の研究 .....	136
8-3	本研究で用いる航行シミュレーション・モデルの概要 .....	139
8-3-1	本モデルの考え方と基本構造 .....	139
8-3-2	航路入口への船舶の到着 .....	140
8-3-3	航路入口への船舶の進入 .....	142
8-3-4	航路内における船舶航行挙動 .....	143
8-3-5	モデルの現象再現性に関する検討 .....	145
8-4	混雑に伴う時間的損失の費用換算 .....	146
8-5	結 語 .....	148
第 9 章	航路計画の検討手順と簡単な例題 .....	151
9-1	概 説 .....	151
9-2	航路計画の検討手順 .....	151
9-3	簡単な例題 .....	155
9-4	結 語 .....	158
第 10 章	結 論 .....	161
謝 辞	.....	165
主要記号一覧	.....	166

# 第1章 序 論

本研究は、航路計画の合理的な方法論を提案するとともに、これに沿って計画を策定する際に必要となる海上交通流の挙動を解析しようとするものである。

古来、船は風や波といった自然条件を克服しさえすれば、海上を自由にかつ安全に航行することができた。このような時代には航路計画は一部の例を除いてほとんど必要とされなかった。また必要とされた数少ない例も、陸岸を開削して短絡航路を設けたり（我が国の例では音戸瀬戸や奥南航路など）、河口を増深して河川を内水路化する場合が多く、航路計画にそれほど精緻さが要求されたわけではなかった。しかし、1960年代から船舶交通量の増加と船舶の大型化が進展し、航路上での恒常的な交通混雑が次第に顕著となってきた。一方、危険物輸送船の増加や航路をとりまく水域の利用の高度化が進むにつれて、航路上で一たび事故が発生すると経済的損失はもとより環境面においても甚大な被害をこうむる傾向にある。そのため、多くの主要な航路では、旧来の姿のままでは安全かつ円滑な海上交通の疎通を図るという航路の機能が十分発揮されない状態となりつつある。

このような状況から航路の整備が要請されているのであるが、航路計画では必然的に上述のような種々のリスクを取り扱わざるをえず、これらリスクの分析と評価を必要とする点で、一般の交通施設計画と異なるものがある。航路計画では一般に航路の計画主体とリスクを受容する主体が異なるが、この点に関する研究がこれまでほとんど見られなかったこともあって、ともすれば計画者と航路利用者とが意思の疎通を図ろうとしても共通の言葉に不足をきたしていたように著者には見受けられる。

また、海上交通を対象とする計画であるため、海上交通流の挙動とその評価に関する知識が必要となるが、現段階における海上交通工学の成果は、そのほとんどが交通現象の記述と統計的な分析に留まっており、しかもその全てが航路計画に直接利用できる形に整理されているわけではない。したがって、合理的な航路計画を策定するためには、計画方法論の構築とともに、そこで用いる海上交通流の挙動に関する知識をも利用しやすいかたちで整理しておくことが必要となる。

以上のような背景を踏まえて、本研究では航路計画を策定する際に必要となる海上交通流の挙動解析とその評価の方法を示すとともに、ここから得られた結果を用いて構成される合理的な航路計画の方法論を提案することを目的とする。

本研究は2編からなる本論、ならびに序論と結論から構成される。

第Ⅰ編は、航路における船舶交通流の解析を行うものである。本編で船舶交通流を解析することの目的は2つある。その1つは、第Ⅱ編で提案する航路計画の方法論の具体的内容を整備し、その妥当性を

論じるための基礎を準備することである。航路計画は単なる施設整備計画に留まらず、航路上を航行する船舶を対象とする総合的な交通計画であるべきと著者は考えているが、このためには、もとより計画の実施に伴う船舶交通流の挙動の変化が十分把握されていなければならない。その際、留意しておくべきことは交通流解析は解析結果を利用せんがために行われるのであり、したがってその目的が異なれば解析の視点も異なり、モデル化を行うに際してモデルが有すべき要件も変わってくるということである。しかるに、これまで船舶交通流の解析を主として手掛けてきた海上交通工学の分野における研究には、挙動を単に整理することに重きを置いたものが少なくない。もちろん、事実を詳細に観察し、これを記述することは重要な仕事である。しかし、著者には、解析した結果がいかにも有効に利用されるかがそれにも増して重要なことのように思える。その意味で、本編では、第Ⅱ編で論じる航路計画の方法論に直接活用しうる形で現象を解明・記述するという視点に立って解析を行う。

さて、船舶交通流を解析するいま一つの目的は、交通流一般の現象をさらに深く見る目を養う端緒とすることである。海上交通に限らず自動車交通や航空機の運航も、数多くの人間—機械系が—団となって交通路を流れてゆくシステムと見なすことができる。そして、個々の操縦者はその場その場の操縦環境に応じて適切な判断（意思決定）を下しながら、自分自身の移動の目的をより多く達成しようと行動する。このような観点からは、全ての交通はその発現の仕方は異なるものの根本的には同一の行動原理に基づいていると言える。自動車交通では、その操縦性の良さの故に、ほとんど運転者の反射的な行動のみによって交通流全体の挙動が規定されているように見えるが、例えば高速道路のランプウェーから輻輳している本線車道への流入部における走行挙動には、他車と接触することのないよう十分留意しながら大胆に進入して行くという運転者の意思決定が色濃く反映しているのを見ることができる。したがって、交通流解析は、どのような種類の交通であれ、基本的に操縦者の意思決定行動にたち返ってなされるべきであると著者は考えている。その際、交通挙動に占める操縦者の意思決定行動の割合がなるべく大きい交通を対象として選ぶことが解析作業を容易なものとする。この意味で海上交通流はまさにうってつけの解析対象となる。

ただし、本研究では後者の目的を常に念頭に置きつつ、第Ⅱ編の準備作業としての先の目的を第一義的な目的として解析を進めることとする。

第2章では海上交通流の特徴を述べ、いくつかの新たな交通流特性を提示するとともに、これまで明らかにされた基礎的な交通流特性の整理を行う。海上交通流の特徴を把握しておくことは以後の解析の助けとなり、交通流特性の整理はより複雑な交通現象を説明する有力な tool となる。

第3章では、海上交通流のマクロな状態を記述する有用な指標の1つである船舶衝突事故危険度に関する解析を行う。その中心となるのは横切りのない航路を対象として構築される OSHICOP — モデル（操作型船舶衝突確率推定モデル）であり、このモデルは航路交差部や横断橋梁が存在する水域をも対

象としうよう拡張される。

第4章では、船舶の避航領域を解析し、種々の状況の下での避航領域の大きさを算定するモデルを提案する。避航領域は船舶のミクロな挙動を説明するのに極めて便利かつ有用な概念であるが、その定義や名称を巡って多くの議論が繰り返されてきた。本章では、この混乱の原因を指摘すると共に、延々と続けられてきた議論を整理し、今後の研究方向を与える1つの考え方を示す。さらに、上述した避航領域算定モデルの現象説明力を実態観測調査資料から検証する方法をも提案する。

第Ⅱ編は、航路計画の方法論の考え方とその手順を論じるものである。

航路計画は航行船舶の安全性ととりわけ深いつながりがある。これまで、航路計画への科学的合理性の導入が、航路諸元の最低許容基準を設定する局面までにしかなされていなかった理由として、確保すべき安全性の適切な水準をどこに求めるか、ならびにその水準をどのようにして設定するかという点が明確でなかったことが指摘できる。また、現段階では安全性ほど表立って論議されないが、迅速性や操船の容易さという意味での快適性などについても同様であり、さらに航路にどのような機能を期待するかということについても具体的な提示がなかった。つまり、①航路計画の目的のあいまいさ、②航路機能の定量的把握の欠如、③計画変数と航路機能の対応づけの欠如、の3つの問題が残されていたがために、合理性に裏付けされた航路計画を策定しえなかったといえる。

そこで、本編では上記の問題点を踏まえ、第Ⅰ編で得られた成果をも援用して、合理性に裏付けられた航路計画を策定するための方法論に関する基本的な枠組みを、リスク・アセスメントの考え方を参考にして提示する。次いで、いくつかの航路機能の定量化を図り、その統一的な評価のあり方と具体的な方法を検討する。そして、これらの結果を総合し、航路計画の検討手順として取りまとめる。

第5章では、航路計画の基本的な考え方を論じる。ここでは、航路計画の目的と計画領域など計画を構成する基本要素を示し、本編で提案する航路計画の方法論を特徴づける諸点に関して著者の考えを述べる。これは、従来の方法が抱えていた問題点に対する1つの解答を示すものである。そして、これらの特徴を組み込んだ方法論を構築するために必要となる具体的な作業を提示し、全体における位置づけを明らかにする。ここで示された作業のうち主要なものについては第6章から第8章でより詳細に検討される。

第6章では、航路上での船舶衝突確率が、航路の機能の1つである航行安全性および混雑の程度を表わす定量的なよい指標となりえることを指摘する。そして、航路諸元と航行規制に関する種々の計画変数の変更、すなわち航路計画代替案の望ましさを、船舶衝突確率をメジャーとして用いて定量的に評価する。この検討を通じて、航路の整備の効果と航行規制の効果を統一的に評価しうること、ならびに双方が互いに相補的な関係にあることが理解される。

第7章では、第6章で行われた航行安全性の観点からの航路計画の定量的評価を他の機能からみた評

価と統一的に比較するため、貨幣タームに変更する方法を示す。

第8章では、航路の機能のうち航行の迅速性に着目し、この観点から航路計画の分析と評価を行う。ここでは、航路計画代替案を実施することにより実現する迅速性の面からみた交通状態を推定するため、航行シミュレーション・モデルを開発する。同時に、第7章と同様に、迅速性の面からみた航路計画の定量的評価を貨幣タームに変換するため、航行船舶の遅延損失を算定する方法についても述べる。

第9章は、第5章で示した航路計画の基本的枠組みに、第6章から第8章までで検討した結果を組み込み、航路計画の検討手順として総合化する章である。検討手順の提示に引き続き、簡単な事例に対する数値的な検討を通じて、本研究で提案する現象分析モデルや方法論の妥当性が示される。

第10章は結論であり、本研究で得られた主要な結果を取りまとめると共に、今後の課題についても述べる。

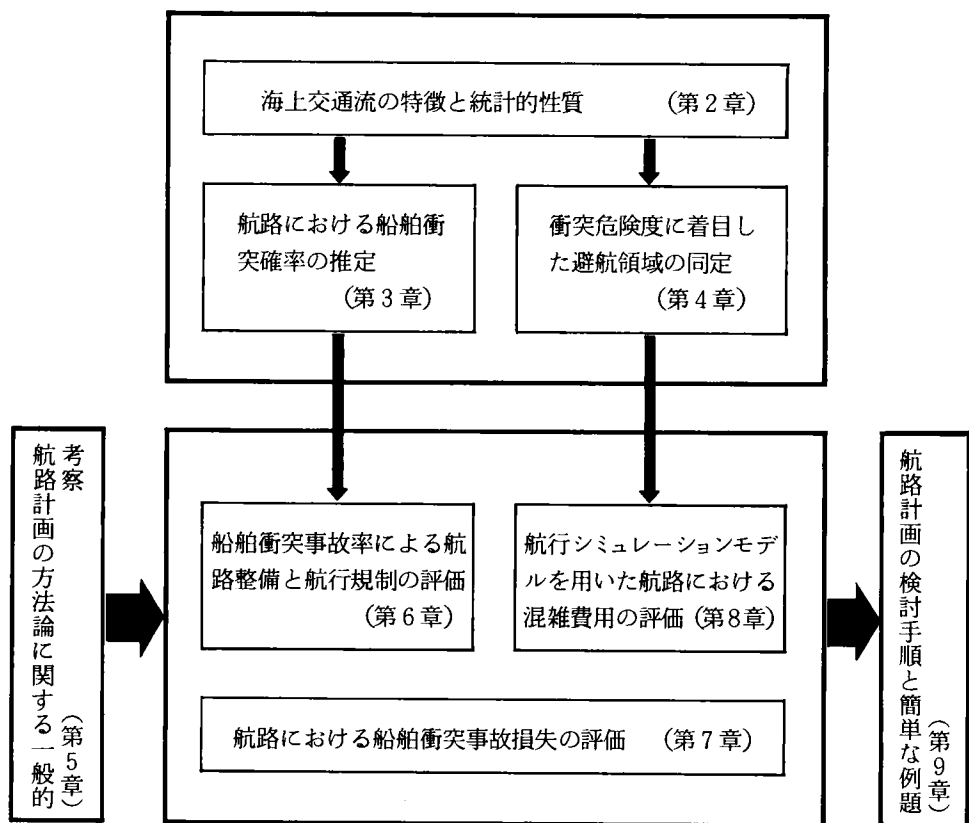


図 1-1 本研究の構成

# 第 I 編

## 航路における海上交通流解析に関する研究

## 第2章 海上交通流の特徴と統計的性質\*

### 2-1 概 説

航路の計画は、航路上を航行する交通の実態に即したものであることが要請されるが、そのためにはまず、どのような航路条件、交通条件の下でどのような交通現象が生じるのかを知っておく必要がある。交通流を取り巻く諸条件と交通現象とを関連づけることを交通流解析と言うが、多くの場合、既に明らかにされた交通流の基本的な性質を用いて、より複雑な交通現象が説明される。この基本的な性質が交通流特性と呼ばれるものであって、交通流を構成する個々の船舶の挙動をさまざまな側面から眺め、全体としてどのような傾向を持っているかを記述する指標である。したがって、今後種々の交通流解析を行うためには、まず海上交通流の基本的な交通流特性を知っておくことが必要となる。

海上交通工学は、世界に先がけて我が国で始められてからまだ20年に満たない若い学問分野であるが、今日に至るまで、その相当部分の努力が海上交通流の観測とその結果を解析して交通流の特性を明らかにするために振り向けられてきた。そして、この種の研究の積み重ねにより、海上交通流の基本的な特性はかなりの程度整理されてきている。

そこで、本章では、次章以降の解析を進める上で基礎となる基本的な交通流特性を、著者が明らかにしたものをも含めて整理する。その際、海上交通流の特徴をあらかじめ把握しておくことが理解を助け、また新たな解析の手掛かりを与えると考えられるため、第2節では解析結果の提示に先立って、海上交通流の特徴について述べる。第3節と第4節では、第3章で提案するOSHCOP-モデル構築のために著者が新たに観測し、解析を行った方位角分布と避航開始距離分布について説明する。また、第5節は第4章で議論する避航領域の同定に関する諸問題に取り組む端緒となった避航船舶の離隔距離を整理した結果を示すものである。第6節には、これまでに明らかにされている上述以外のいくつかの主要な交通流特性を紹介するが、ここでは結果を示すにとどめ、詳細については参考文献を参照されたい。第7節には交通流特性ではないが、海上交通流を解析する上で利用することの多い船舶諸元相互の関係のうち、次章以降の解析で用いるものを示しておく。

### 2-2 海上交通流の特性

交通流の挙動は、それを構成する要素—自動車、航空機、船舶、歩行者など—の違いによって大きく異なる。これらのうち、最も古くから解析が進められているのが自動車交通流であり、これはまた我々にとって最も身近な交通でもある。ところで、交通流を解析しようとする際に、対象とする交通流の基

---

\*本章の一部は文献1)～5)として発表している。

本的な特徴を把握しておくことが理解の助けになることはしばしば経験されることである。そこで、本節では次節以降の解析に先立ち、海上交通流の特徴を自動車交通流と比較することにより明らかにする。

(1) 自動車交通流が基本的に1次元的な流れであるのに対し、海上交通流は2次元的な流れである。

交差部、分合流部および織込み区間（ウィービング）を除いた道路では、基本的に自動車交通流は1次元的な流れとなっている。ここに、“1次元的な流れ”とは交通流の構成要素である個々の自動車の挙動が主として道路の長手方向の位置の変化のみで記述され、幅方向の変位は無視しうる程度であることを意味する。これは、

- ① タイヤと道路の間の摩擦を利用して走行しているがために、側方変位はほぼ完全にコントロールしうる。
- ② 加減速特性に優れているため直前を走行する車の動きに応じた運転が可能となり、追従走行をすることができる。
- ③ 上記の特性から、道路上に車線が設定され、追い越し時等を除いてこの車線上を走行することが定められている。

という理由からと考えられる。一方、海上交通では全くこの逆の理由、すなわち、

- ① 推進力により移動する浮体であるため、側方変位を完全にコントロールすることが困難である。
- ② 近傍を航行する他船との間に流体力が働き、保針が困難となるため、ある程度以上には接近して航行することが困難である。
- ③ 航行速度が個々の船舶ごとに異なること、ならびに加減速に時間を要し、かつ他船舶との意思の疎通も十分ではないことから追従航行が困難である。
- ④ 航路上には通行レーンの概念がない。

という特徴から基本的に2次元的な流れとなる。

(2) 船型のばらつきが極めて大きい。

自動車交通流を構成している車両は、小は自動二輪車（あるいは自転車）から大はたかだか大型トラックまでであり、車両長で見ても約2mから12m、6倍程度の幅しかない。これに対して海上交通流では数トンの漁船から数十万トンの巨大タンカーまで極めて広範囲にわたる。船舶の大きさはそのまま運動特性に反映されるため、船型が広範囲にわたっていることは小型船と巨大船で運動特性が大きく異なることを意味する。このように、多様な挙動を示す船舶が航路上を混在して航行していることが海上交通流の1つの大きな特徴である。したがって、海上交通流を解析するには、このことを十分念頭に置いておく必要がある。

(3) 交通流の挙動に影響を及ぼす要因が極めて多い。

交通流の挙動は、自動車あるいは船舶といった交通流を構成する要素の特性とこれを取りまく交



通環境の両者から規定される。前者に属するものとして海上交通では個々の船舶の特性と操船者に関する特性があるが、船舶の特性は船体の大きさだけでなく旋回性や追従性、保針性、あるいは加減速性能など数多くの要因に依存し、また操船者についても多くの資質が要求される。後者に関しては、風、波、潮流、視程といった多くの要素からなる自然条件の影響をとりわけ大きく受け、さらに、航行船舶をとりまく交通環境や他船との遭遇状況も多岐にわたる。一方、自動車交通流に目を移すと、道路の状態は一定の規格の下に整備され、運転性能も通常の走行状態では満足のいく水準に達している。このように、海上交通流の挙動に影響を及ぼす要因が極めて多く、それ故、交通流の状態を特徴づける各種の指標と影響要因との関係を観測データを用いて統計的に整理することが容易でない。また、既往の解析結果の中にも着目していない要因が及ぼす影響を分離していないものが見うけられる。このことが、海上交通流解析の進歩を遅らせた1つの原因とも考えられる。

- (4) 影響を及ぼす要因のうち、その大きさが常に変動しているものが多い。

海上交通流の挙動に自然条件が大きく影響することは上で述べたが、自然条件の中には、波や風、流れなどのように時間的、空間的に常に変動しているものが数多くある。これらは船体に常時作用する外力であるため、これらが持つ不確実性(ここでは randomness)が個々の船舶の船体運動に不確実性をもたらす主要な原因の1つとなる。

- (5) 操船に対する船体運動の反応が遅いため、航行挙動に及ぼす human factor の影響が卓越している。

自動車は船舶に比べて加減速や回転性能に優れており、走行状態の敏速なコントロールが可能である。したがって、運転操作もほとんど反射的に行われると言ってよい。しかしながら、船舶は操船に対する船体運動の反応が遅いため、操船者はあらかじめ今後起こりうる状況を推測し、行動を決定する必要にせまられる。また、(4)に述べた不確実性の存在はこの決定を一層困難なものとしている。このような状況の下で操船者は技術と経験を頼りに時々刻々の行動を決定していくのであるが、このことから海上交通流の航行挙動に及ぼす human factor の影響が極めて大きいことが理解される。

- (6) 航行挙動のばらつきが大きい。

上に述べた(4)、(5)から、外力の変動によりもたらされる航行挙動の不確実性ならびに操船者の認識・判断に起因してもたらされる航行挙動の不確実性が大きいことがわかる(図2-1参照)。そのため、航行挙動を特徴づける種々の指標はいずれもある程度ばらついていることが多い。このことは、海上交通流の挙動を記述するにあたり、決定論的な記述よりも確率論的な記述をすることの方がふさわしいものとなる可能性を示唆するものである。

- (7) 事故発生時の被害が一般に大きい。

自動車交通においても事故の発生は、とりわけ死傷者が多数にのぼるという面から大きな問題と

なっているが、一般に、事故が発生した場合の被害は海上交通の方が大きく、特に大型船や巨大船あるいは危険物輸送船の場合は極めて甚大なものとなる。そのため、操船者は事故の発生を努めて避け、安全性の確保のためには非常に慎重になるといった点で操縦者の基本的態度が自動車交通と異なるものがある。それ故、操船者の行動モデルの作成や交通流の評価を行う際にはこのことを十分考慮に入れておくことが重要である。

(8) 交通流の状態が主として安全性の変化に反映される。

自動車交通では混雑が進むにつれて走行速度が低下し、所要時間の増加が顕著となってくるが、1台当りの事故危険度は逆に減少する傾向にある<sup>6)</sup>。一方、海上交通では航路上での混雑が甚だしくなるほど事故危険度が増大するが、所要時間の変化はさほどでない。この事実が(7)で述べた操縦者の態度とも関係しているものとも考えられるが、交通流の評価を行う際に同様の考慮が必要となる1つの理由と言えよう。

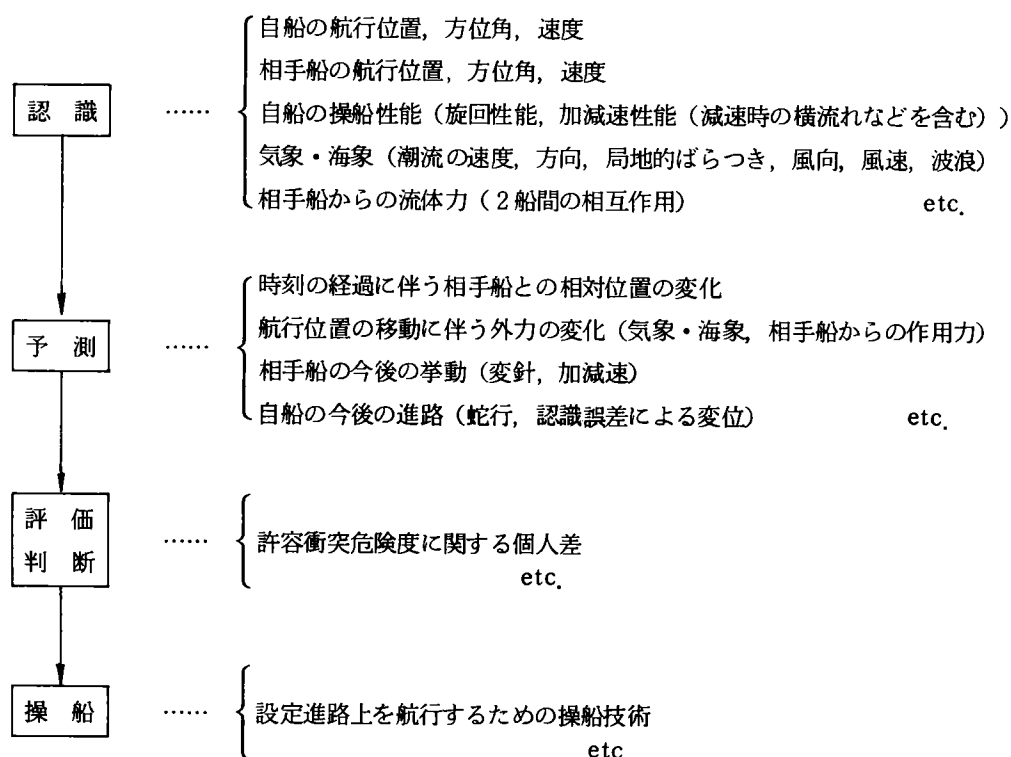


図2-1 避航操船プロセスに存在する不確実性

### 2-3 方位角分布

一様な航路においても、船舶の航跡は常に航路に平行であるということではなく、進行方向にはばらつきが見られる。これは、自船の船位測定誤差、波や潮流、風によるドリフト、応答遅れによる蛇行運動（周期的ヨーイング）、他船や障害物に対する避航、ならびにこれらの原因によりはずれたコースラインへ戻るための操船などに起因するものである。そして、操船行動は、「自船が航路内のどの位置を航行しているか」という情報だけでなく、「どのような方向に航行しており、進路は安全な水域内にあるか」という情報の両方を判断材料として決定されると考えられる。したがって、船舶の進行方向も航路幅方向の航行位置と同様に重要な交通特性となりうる。以後、ある地点における船舶の進行方向と航路中央線とのなす角を「方位角」と呼び、ある地点を通る多数の船舶の方位角のばらつきを「方位角分布」と名付ける。航路航行船舶の方位角分布はこれまでに見られない新たな概念であり、既往の報告もないため、浦賀水道船舶航行実態観測調査データ<sup>7)</sup>を用いて解析を行った。図2-2に示す浦賀水道航路を、屈曲の影響を考えてX軸方向に大きく3分割し（A～C）、各区間をさらに6分割した（①～⑥）。当航路は中央分離線が表示された2方向航路であるため、Y軸方向には片側10区間、合わせて20区間に分割した。こうして分割した片側180、合計360のメッシュ上における船舶の方位角を読み取り、正規確率紙上にプロットしたところ、ほぼ正規分布に従うとみなせる結果を得た。そのうちの数例を図2-3に示す。

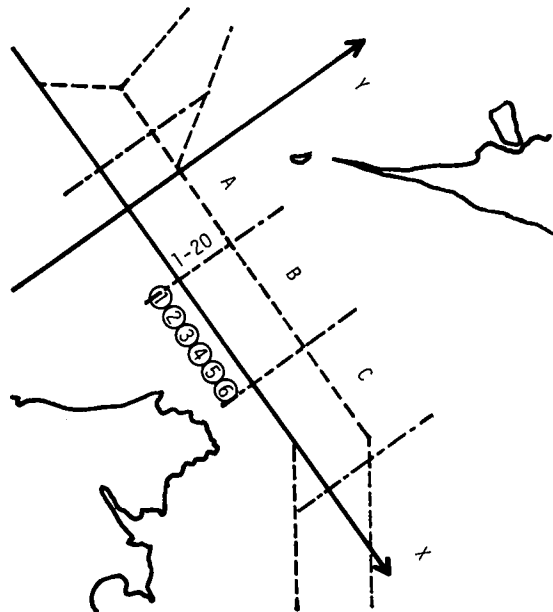


図2-2 浦賀水道航路と解析のための区間分割

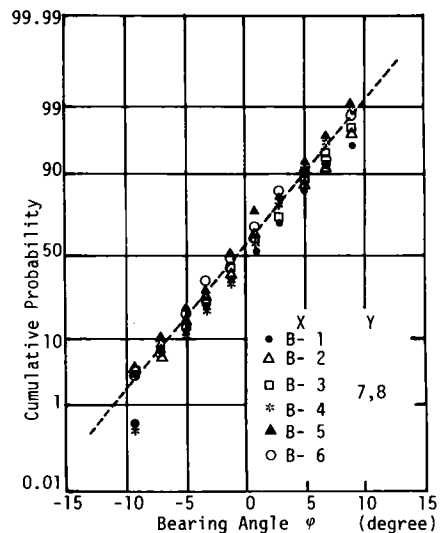


図2-3 方位角分布

また、分布の平均値と標準偏差が航路方向および航路幅方向でどのように異なるかを見るため、航路屈曲の影響の小さいと思われるBの区間について、メッシュごとの平均値と標準偏差を図2-4、図2-5にまとめた。これを見ると、航路側端部では、航行する船舶が少なく標本数も少ないため、平均値と標準偏差の値はばらつくものの、標本数の多い航路中央部では、平均値、標準偏差ともに航路方向にも航路幅方向にもほぼ一定値をとる。これより、一様な直線航路においては、方位角分布は航路のどの部分でもほぼ同じ平均値と標準偏差を持つ正規分布。

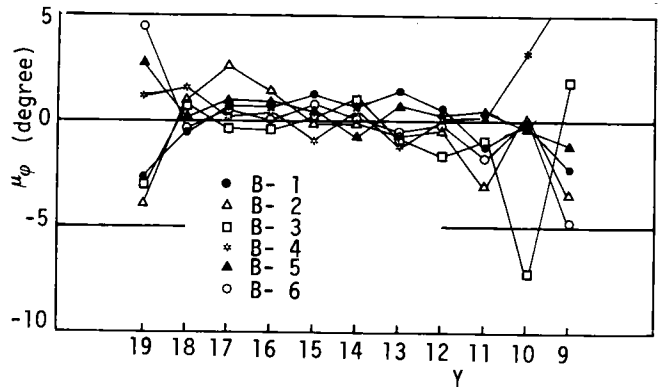


図2-4 方位角分布の平均値

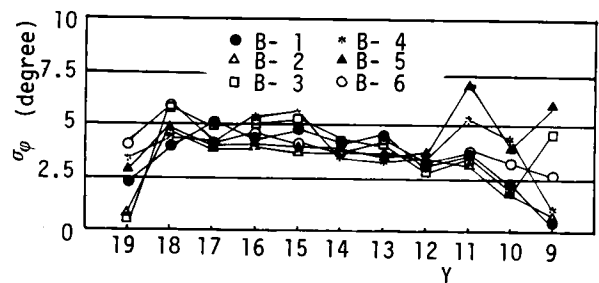


図2-5 方位角分布の標準偏差

$$\phi_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\varphi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi - \mu_{\varphi}}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right] \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

に従うとの結論を得た。ここに、平均値 $\mu_{\varphi}$ はおおむね航路方向に一致し ( $\mu_{\varphi}=0^{\circ}$ )、標準偏差 $\sigma_{\varphi}$ は約 $4^{\circ}$ である。ある方位角 $\varphi$ で航行している船舶が、航路端にある程度まで近づいた時点で $-\varphi$ の方位角に変針して航路中央部に向かうものと推測すれば、 $\mu_{\varphi}=0^{\circ}$ は予想と一致する結果と言えよう。

## 2-4 避航開始距離分布

避航開始距離は、自船と避航対象との相対的位置関係の測定誤差と将来予測のばらつき、および「危険な状態」なる概念のばらつきが「危険になった」と認識する時期をばらつかせ、さらに、他船に対する避航など当該避航対象に対する避航が望んだ時期にできない場合があることなどにより、かなりのばらつきが見られるため、分布形をなした交通特性と考えるのが妥当であろう。

### 2-4-1 同航・反航船舶に対する避航開始距離分布

船舶相互の避航開始距離 (Give-Way Starting Distance: G.W.S.-距離)  $l$  は個々の避航形態によ

って大きく異なる。以下では、ばらつきを有する避航開始距離が、船舶特性や交通特性に依存する確定値項と、操船者の経験や天候など本モデルで明示的に取り扱っていない諸要因に起因するランダム項からなっているものと仮定して解析する。避航開始距離は、行き合い（Head-on）、追い越し（Overtaking）、被追い越し（Overtaken）（以後、それぞれ添字、 $H, T, O$ で表す）に対して以下の形で表される。一方、ランダム項はこの確定値項による推計値と実現値との残差を種々の説明変数に対して解析した結果に基づき定めた。

$$\left. \begin{aligned} l_{kk'H} &= \alpha_H + \beta_H V_k + \gamma_H V_{k'} + \delta_H \varepsilon_H \\ l_{kk'T} &= \alpha_T + \beta_T L_k + \gamma_T L_{k'} + \delta_T (L_k + L_{k'}) \varepsilon_T \\ l_{kk'O} &= \alpha_T + \beta_T L_{k'} + \gamma_T L_k + \delta_T (L_k + L_{k'}) \varepsilon_T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、 $V$ は速度、 $L$ は船舶長（垂線間長）であり、以下添字 $k, k'$ は着目船と相手船を意味するものとする。 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は偏回帰係数であり、 $\varepsilon$ は平均値0、分散1の標準正規確率変数である。式(2.2)のランダム項は、操船者の経験、天候などの本モデルで明示的に扱っていないランダム要素の影響を表している。

式(2.2)で示した避航開始距離分布の確定値項のパラメーター $\alpha_H, \beta_H, \gamma_H$ 、および $\alpha_T, \beta_T, \gamma_T$ は運輸省第三港湾建設局の実態調査資料<sup>8)</sup>より求めた。表2-1にその値を示す。図2-6は実績値 $l_{kk'H}, l_{kk'T}$ と推定値 $\hat{l}_{kk'H}, \hat{l}_{kk'T}$ の残差をそれぞれ $\delta_H, \delta_T(L_k + L_{k'})$ で基準化して正規確率紙上にプロットしたものである。データ数は少ないが、 $\varepsilon$ を標準正規分布と仮定しても大きな過ちはないと考えられる。

表2-1 避航開始距離分布の偏回帰係数

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
$H$	-931.4	4.59	4.59	220.0
$T, O$	87.1	6.40	1.60	2.45

$H$  : Head-on,       $T$  : Overtaking,  
 $O$  : Overtaken

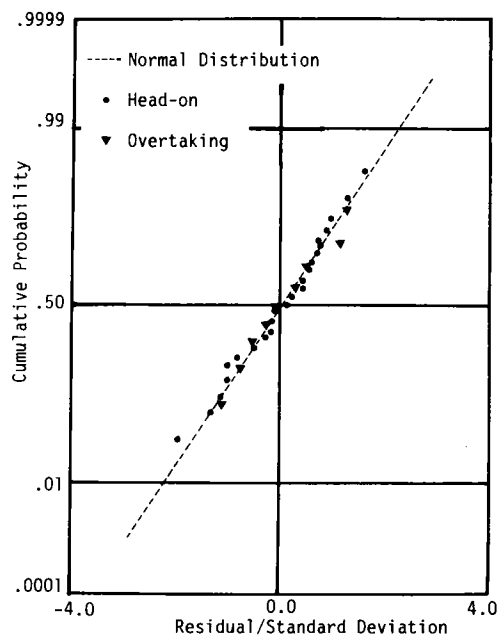


図2-6 避航開始距離のランダム項の分布（追い越し）

## 2-4-2 交差船舶に対する避航開始距離分布

義務船が避航を開始した地点から保持船の進路との交点までの距離を「避航開始距離,  $l_{kk'}$ 」と名付ける。この避航開始距離は船舶特性, 交通特性等により異なる値をとり, かつ操船者特性や自然条件によるばらつきを持っていると考え,

$$l_{kk'} = \bar{l}_{kk'} + \varepsilon \quad \dots (2.3)$$

と表す。ここで,  $\bar{l}_{kk'}$  は上述の諸特性の関数となり,  $\varepsilon$  はランダム変数である。運輸省第三港湾建設局の観測結果<sup>9)</sup>より,  $\bar{l}_{kk'}$  は義務船の総トン数  $GT_{k'}$ , 義務船の速度  $V_{k'}$ , 避航開始時の2船間の距離  $R$  の関数とすれば説明力が高く,

その時の残差  $\varepsilon$  の分布は, 平均値0の正規分布と見なせることがわかっている。残差の分布の1例を図2-7に示す。このことより, 着目船および相手船の避航開始距離分布  $f_l(l_{kk'}^S)$ ,  $f_l(l_{kk'}^G)$  は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} f_l(l_{kk'}^S) &= -177.1 + 12.0 GT_{k'} + 0.24 V_{k'} + 0.86 R + N(0, 243^2) \\ f_l(l_{kk'}^G) &= -177.1 + 12.0 GT_k + 0.24 V_{k'} + 0.86 R + N(0, 243^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

とし, 避航開始時の両船間距離  $R$  はデータの平均値から1,500(m)とした。単位は  $GT$  がトン,  $V$  が m/min である。

## 2-4-3 橋脚に対する避航開始距離分布

航路横断橋などの海洋構造物への衝突を解析するには, 操船者が衝突の危険を感じてから避航操作をとり, 障害物を回避したのち安全に通過するという一連の挙動を考える必要がある。ここでは, 避航挙動を定量的にとらえるため, 橋脚にどの程度近づいてから避航動作をとりはじめるかという「避航開始距離」に着目する。

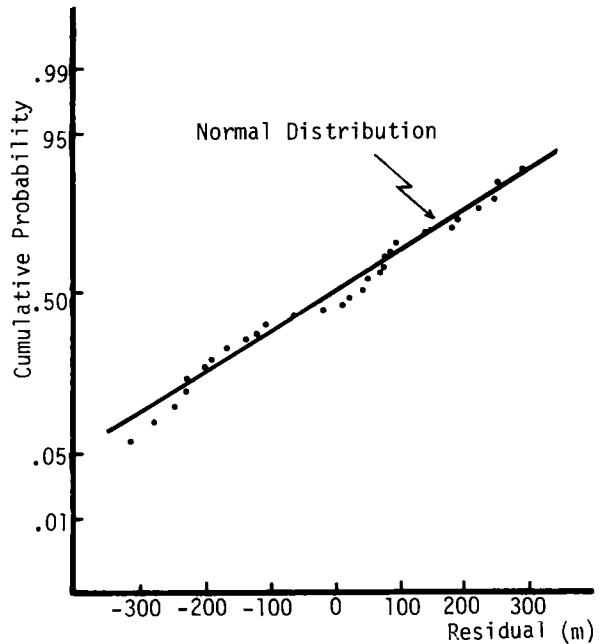


図2-7 避航開始距離のランダム項の分布(横切り)

固定された構造物に対する避航挙動に関しては、わずかに山口ほか<sup>10)</sup>による避航開始距離ならびに離隔距離の観測結果が報告されているにすぎず、これとても統計的処理に耐えうるサンプル数が提示されているわけではない。そこで、橋脚に対する避航開始距離の分布形を求めるため、実態観測を実施した。

観測場所は山口県の大島瀬戸であり、ここにかかる大島大橋の下を航行する船舶の航跡を2基のレーダーで観測した。観測期間は昭和57年10月4日～7日の72時間であり、観測結果のうち約200隻の船舶の避航開始距離を集計した。解析は、撮影画像上における航跡の形状に注目することにより橋脚間を通過するための最後の避航（すなわち、それ以降は橋脚間を通過し終えるまで直進する）を開始した地点と橋脚との距離をデジタイザで測定し、実距離に換算した。その結果を対数

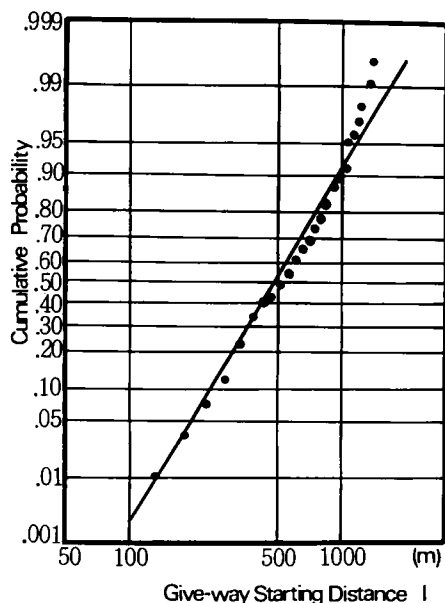


図2-8 橋脚に対する避航開始距離分布

正規確率紙上にプロットしたものが図2-8である。これより、本観測データに基づく避航開始距離の分布はほぼ次式に示す対数正規分布、

$$f_l(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} l \sigma_l} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\log l - \mu_l}{\sigma_l} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

に従い、その平均値  $\mu_l$  は 6.15、標準偏差  $\sigma_l$  は 0.59 であることがわかった。

大島瀬戸以外の航路横断橋が設置されている水路で同様の調査・解析を行えば、さらに、平均値や標準偏差といったパラメータを橋脚間隔や水路形状と関係づけることが可能となろうが、我が国には適切な場所が最近まではほとんどなかったため、これらは今後の研究に期待したい。

## 2-5 避航船舶の航過距離分布

避航は混雑流における船舶挙動の最も重要な局面である。これまで、船舶の避航挙動に関する交通特性として、先に示した避航開始距離の他に避航領域の大きさが数多くの研究者によって観測・整理されてきた。この避航領域は一言でいえば「船舶がそれ以上相手船に近づこうとしない領域」であり、交通流全体の挙動をモデル化する基礎的概念として有用なものではあるものの、実際の避航動作の有無によらず近傍を通過する全ての船舶の航跡を元に求められていたため、避航挙動の特性のみを示すものではなかった。そこで、本節では、実際に避航動作をとった船舶が相手船の前後あるいは側方を通過する際

の両船の距離の分布を同定する。

用いるデータは昭和56年10月に京浜運河で観測された48時間分のレーダー観測データ<sup>11)</sup>である。図2-9に示すように、東扇島北側屈曲部の高台に主レーダーを、浮島川崎港廃油処理場に副レーダーを設置し、主レーダーは撮影間隔4分間、副レーダーは2分間で撮影している。解析に当っては、レーダー撮影画像を拡大・焼付けしたものを用いたが、主レーダーの

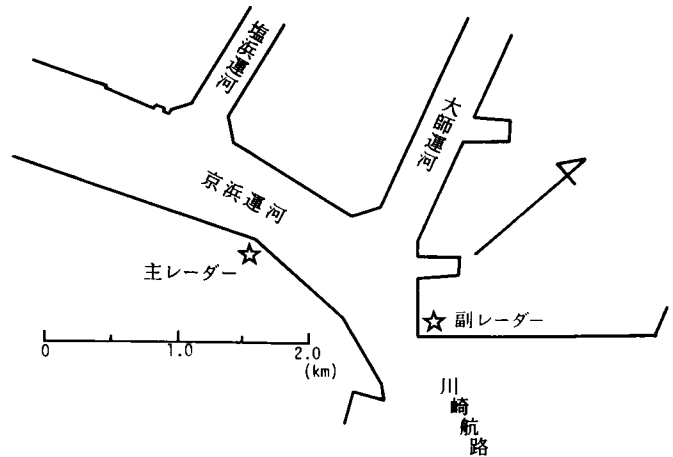


図2-9 京浜運河の概略図

方は画像が不鮮明であったので副レーダーの方のみを使用した。観測水域を航行する船舶はほとんどが500GT以下の小型船であり、平均速度は約9ktである。

レーダー画像の撮影と同時に、目視観測も行われており、相互に対照することによってレーダー写真上の船影の船種、船型を知ることができる。船型についてはトン階だけでなく、実際の総トン数も記入されているので、船舶の大きさの違いによる避航船舶の航過距離を知ろうとする本解析のデータとしてとりわけ適している。

まず、レーダー写真上の航跡をつぶさに調べ、明らかに避航動作をとったと見なされる船舶とそうでない船舶とを分離する。そして、避航船舶とその相手船(被避航船)の双方からなる航跡対を抽出し、被避航船舶を基準とする相対航跡に変換する。そして、同航船に関しては、避航船舶の相対航跡が被避航船舶の船首尾線後方と同上真横を横切る時の両船の距離を後方航過距離と側方航過距離の観測値とする。反航船に関しても、同様に、相対航跡が被避航船舶の船首尾線前方と同上真横を横切る時の両船の距離を前方航過距離と側方航過距離の観測値とする。

一方、避航船舶の航過距離 $u$ が平均値 $\mu_u$ とランダム項 $\varepsilon_u$ の和

$$u = \mu_u + \varepsilon_u \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

で表現されるものと仮定し、さらに $\mu_u$ が $u$ の大きさに影響を与える種々の因子の線形結合、

$$\mu_u = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$X_i$  : 航過距離の大きさに影響を与える因子,       $\beta_i$  : 偏回帰係数



で表わされるものと仮定する。そして、観測結果を用いて重回帰分析を行うことにより (2.7) 式の偏回帰係数を求める。また、ランダム項  $\varepsilon_u$  は観測値と平均値との偏差からその分布形を求める。本章第2節でも述べたように、操船行動に内在する不確実性のゆえに、その結果として現れる避航航跡にはばらつきが生じる。人的要因の入り込む余地の大きい海上交通では、このばらつきは自動車交通に比べて大きいものと思われ、 $\varepsilon_u$  の分散を0とするような推定式の作成は事実上不可能と言うべきであろう。

次に、解析の結果を示す。

ここでは、航過距離の大きさに影響を与える因子として、

- ① 被避航船舶の船舶長  $L_1$  (m)
- ② 避航船舶の船舶長  $L_2$  (m)
- ③ 被避航船舶の速度  $V_1$  (m/min)
- ④ 避航船舶の速度  $V_2$  (m/min)
- ⑤ 交通量  $Q$

の5因子を考えた。ここに、交通量  $Q$  は0.5 マイルレンジのレーダ画面内に存在する航行船舶の隻数である。

以上の5因子と後方航過距離  $u_{OB}$  に関する重回帰分析の結果を表2-2に示す。用いたデータ数は13である。また側方航過距離  $u_{OS}$  に関する結果を表2-3に示す。用いたデータ数は21である。そして、この結果から計算される後方航過距離の平均値と観測値の差を正規確率紙上にプロットしたものが図2-10であり、側方航過距離の平均値と観測値の差を同様にプロットしたものが図2-11である。いずれも、プロットした結果がほぼ直線上にあることから、同航時における避航船舶の航過距離のランダム項は正規分布に従うと判断できる。その平均値は0であり、標準偏差は側方の場合42m、後方の場合84mである。この結果、同航の場合

表2-2 後方避航領域と各変数の関係 (同航)

	重相関係数	単相関係数	線形回帰係数
交通量 $Q$	0.20553	-0.2055	-19.581
船舶長 $L_1$	0.23316	0.0674	4.5306
船舶長 $L_2$	0.25775	0.0052	2.3973
速度 $V_1$	0.73904	-0.6014	-1.2387
速度 $V_2$	0.75236	0.3420	0.4854
定数			275.205

表2-3 側方避航領域と各変数の関係 (同航)

	重相関係数	単相関係数	線形回帰係数
交通量 $Q$	0.02794	-0.0279	-1.2727
船舶長 $L_1$	0.77342	0.7629	5.0100
船舶長 $L_2$	0.79090	-0.4050	-1.4910
速度 $V_1$	0.79815	0.2861	0.1097
速度 $V_2$	0.79824	0.1525	0.0215
定数			-25.119

の避航船舶の後方航過距離  $u_{OB}$  と側方航過距離  $u_{OS}$  は次式のように表すことができる。

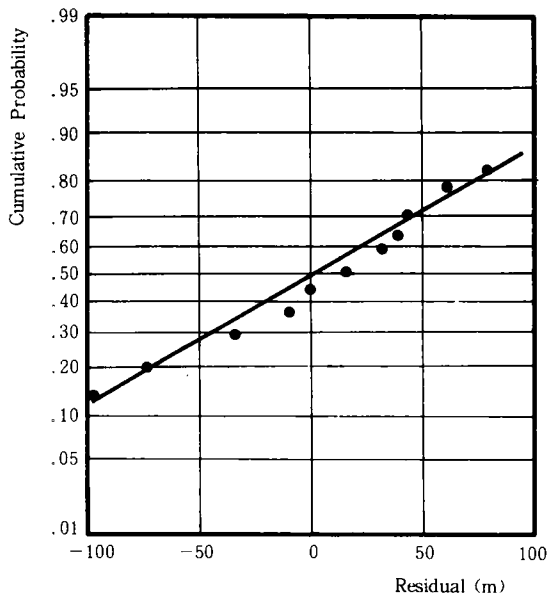


図 2-10 残差の確率分布 (同航, 後方避航領域)

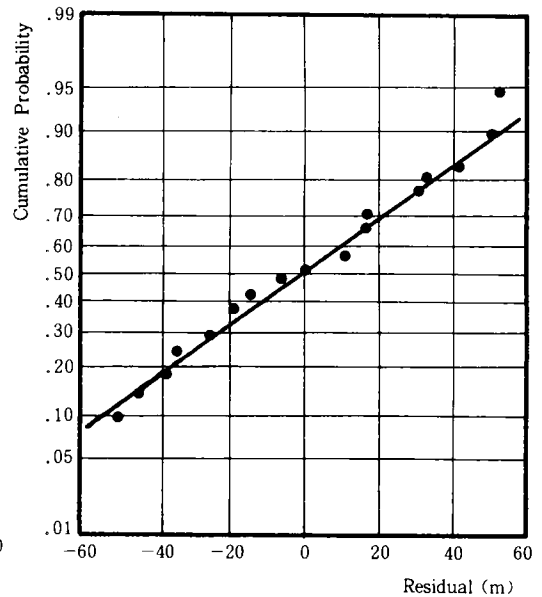


図2-11 残差の確率分布 (同航, 側方避航領域)

$$\left. \begin{aligned} u_{OB} &= 4.53 L_1 + 2.40 L_2 - 1.24 V_1 + 0.49 V_2 - 19.6 Q + 275.2 + N(0, 84^2) \\ u_{OS} &= 5.01 L_1 - 1.49 L_2 + 0.11 V_1 + 0.02 V_2 - 1.3 Q - 25.1 + N(0, 42^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.8)$$

上式より、交通量が増すと後方、側方とも航過距離は短くなるが、その影響の度合は側方よりも後方が大きいことがわかる。これは、避航領域自体の大きさの差によるものと、交通量が増して追越しが困難になるほど被避航船舶の直後まで追従航行し、変針するためと思われる。また、後方航過距離では船舶長よりも速度による影響の方が大きいことがわかった。被避航船の速度 $V_1$ が大きくなると $u_{OB}$ が短くなっているのは追い越す際の相対速度が小さくなるためと考えられる。なお、側方、後方とも避航船舶の船舶長 $L_2$ による影響は小さいと見てよい。

一方、反航船の前方航過距離 $u_{HA}$ に関する重回帰分析の結果を表2-4に、側方航過距離 $u_{HS}$ に関する結果を表2-5に示す。データ数は共に28である。そして、この結果から計算される前方航過距離の平均値ならびに側方航過距離の平均値と観測値の差をプロットしたものが図2-12と図2-13である。同航の場合と同じく、プロットした結果はほぼ直線状を呈しており反航時においても避航船舶の航過距離のランダム項は正規分布に従うと見なすことができる。平均値はいずれも0であり、標準偏差は前方の場合が145m、側方の場合が12mである。この結果、反航の場合の避航船舶の前方航過距離 $u_{HA}$ と側方

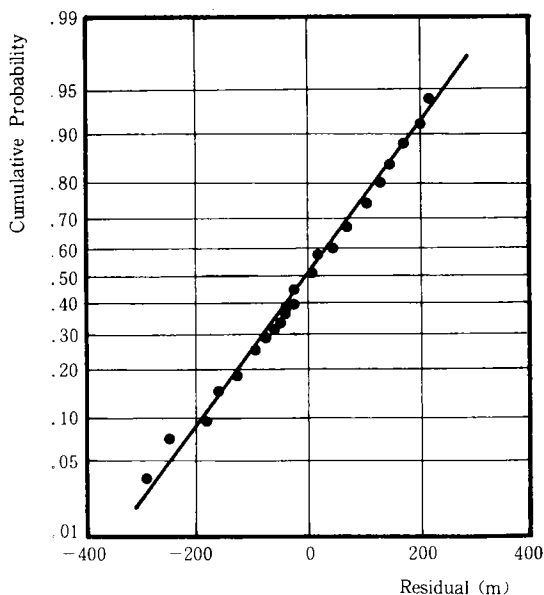


図2-12 残差の確率分布（反航，前方避航領域）

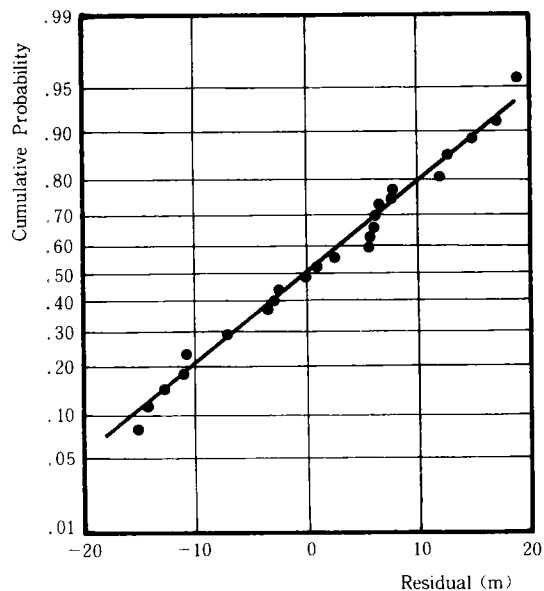


図2-13 残差の確率分布（反航，側方避航領域）

航過距離  $u_{HS}$  は次式のように表される。

$$u_{HA} = 15.29 L_1 - 1.50 L_2 + 1.04 V_1 - 0.63 V_2 - 11.4 Q - 234.6 + N(0, 145^2)$$

$$u_{HS} = 1.34 L_1 + 0.25 L_2 + 0.15 V_1 - 0.04 V_2 - 3.30 Q + 79.5 + N(0, 12^2) \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

反航の場合，前方および側方の航過距離とも被避航船舶の船舶長  $L_1$  によってほとんど規定されるといえる。また，前方・側方とも，交通密度が増大すると同航の場合と同様に航過距離は短くなる。これは予想された結果である。なお，前方航過距離に関して避航船舶の船舶長  $L_2$  による影響が負と

表2-4 前方避航領域と各変数の関係（反航）

	重相関係数	単相関係数	線形回帰係数
船舶長 $L_1$	0.81982	0.81982	15.285
船舶長 $L_2$	0.82475	-0.27989	-1.4996
速度 $V_1$	0.82823	0.38623	1.0375
速度 $V_2$	0.83121	-0.16527	-0.6297
交通量 $Q$	0.83996	-0.02898	-11.363
定数			-234.59

表2-5 側方避航領域と各変数の関係（反航）

	重相関係数	単相関係数	線形回帰係数
船舶長 $L_1$	0.72696	0.72696	1.3427
船舶長 $L_2$	0.73116	0.22723	0.2546
速度 $V_1$	0.79366	0.06188	0.1474
速度 $V_2$	0.79438	-0.11557	-0.0389
交通量 $Q$	0.85681	-0.14492	-3.3027
定数			79.546

でている。これは、船型が大きくなるほど避航動作をとらず進路を保持しようとする傾向が解析資料からも読み取れるため、避航船舶の船型が大きくなると前方航過距離はわずかであるが短くなるという結果が得られたものと思われる。

## 2-6 その他の船舶交通流特性

### 2-6-1 船型構成分布

藤井<sup>12)</sup>は、我が国の主要狭水道における観測結果をもとに、船型を垂線間長の常用対数 $\omega$ で表わした場合の船型構成分布が、正規分布、

$$\phi_{\omega}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\omega}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega - \mu_{\omega}}{\sigma_{\omega}}\right)^2\right] \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

とよい一致を見せることを示している。平均値 $\mu_{\omega}$ と標準偏差 $\sigma_{\omega}$ は水路により異なる値をとる。

### 2-6-2 航行位置分布

井上<sup>13)</sup>は、船舶の水路幅方向の航行位置の分布（航跡分布と名付けられている）に着目し、この航行位置分布 $\phi_x(x)$ が正規分布

$$\phi_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

で表現できることを明らかにした。航路中央から測ったその平均値 $\mu_x$ は、1方向航路では航路中央、2方向では中央分離表示の有無を表すパラメータと、航路幅 $W$ の関数として規定される。標準偏差 $\sigma_x$ についても航路幅 $W$ と $L$ 換算交通量（垂線間長の比で重みづけられた交通量） $Q_L$ を説明変数とする観測式を示している。

$$\mu_x = \begin{cases} 0 & (1 \text{ 方向航路}) \\ 0.1 W & (\text{中央線表示のない} 2 \text{ 方向航路}) \\ 0.2 W & (\text{中央線表示のある} 2 \text{ 方向航路}) \end{cases}$$

$$\sigma_x = -7.170 + 0.105 W + 2.168 Q_L \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

### 2-6-3 速度分布

藤井<sup>14), 15)</sup>は「船舶明細書」記載の満載速力と垂線間長の関係を調べ、航行速度の分布が正規分布にほぼ従うことを示した。その平均値 $\mu_v$ は垂線間長 $L_{pp}$ と次式のように関係づけられる。

$$\log \mu_v = 0.29 \log L_{pp} + 0.23 \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ここに、 $\mu_v$ の単位はm/sec、 $L_{pp}$ の単位はmである。また、対数標準偏差は0.06であり、これは約1.5

kt (0.77 m/sec) に相当する。

#### 2-6-4 到着時間間隔分布

原<sup>16)</sup>は明石海峡における観測結果を解析し、単位時間 $dt$ 内の船舶到着隻数が $k$ 隻である確率がポアソン分布、

$$P_k = \frac{m^k}{k!} e^{-m} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

に従うことを示した。ここに $P_k$ は $dt$ 時間内に $k$ 隻の船が通過する確率、 $m$ は $dt$ 時間当たりの平均通過隻数である。これより、到着時間間隔分布、即ち、ある船舶が所定のゲートラインを通過してから次の船が通過するまでの時間 $T_d$ が $t$ 分と $t+dt$ 分間である確率は、

$$P \{ t \leq T_d \leq t + dt \} = e^{-mt} - e^{-m(t+dt)} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

で与えられる。

#### 2-6-5 船舶諸元相互の関係

船の計画喫水線と船体の前端および後端との交点をそれぞれ通る2本の鉛直線を“垂線”といい、その間隔を垂線間長という。これを基本として種々の船舶諸元の相互関係が整理されている。<sup>17)</sup>これらのうち、次章以降の解析に用いるものを以下に列挙しておく。

全長 ( $L_T$ )  $\sim$  垂線間長 ( $L_{pp}$ )

$$\log L_T = (1 + \alpha) \log L_{pp} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.10 & \text{for } \sim 500 \text{ GT} \\ 0.08 & \text{for } 500 \sim 3000 \text{ GT} \\ 0.06 & \text{for } 3000 \sim 20000 \text{ GT} \\ 0.05 & \text{for } 20000 \text{ GT} \sim \end{cases}$$

型幅 ( $B$ )  $\sim$  垂線間長 ( $L_{pp}$ )

$$\log B = 0.88 \log L_{pp} - 0.47 \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

型深 ( $D$ )  $\sim$  垂線間長 ( $L_{pp}$ )

$$\log D = 0.97 \log L_{pp} - 0.99 \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

総トン数 ( $T$ )  $\sim$  垂線間長 ( $L_{pp}$ )

$$\log T = 2.81 \log L_{pp} - 1.81 \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

逆転制動距離 ( $D_s$ )  $\sim$  垂線間長 ( $L_{pp}$ )

$$\log D_s = 1.46 \log L_{pp} + 0.01 \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

逆転制動時間 ( $T_s$ ) ~ 垂線間長 ( $L_{pp}$ )

$$\log T_s = 1.06 \log L_{pp} + 0.23 \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

## 2-7 結 語

本章では、海上交通流を解析する際の基礎となるいくつかの重要な交通流特性を明らかにするとともに、これまでに得られた分析結果を列挙・整理し、次章以降の準備を行った。また、海上交通流の特徴についても若干の検討を加え、既にかんりの研究の進展が見られる自動車交通流の特徴と比較・対比する形でこれを示した。本章の主たる内容をまとめると以下のようになる。

- (1) 自動車交通流に対する海上交通流の主たる相違点を、①運動の2次元性、②操縦性の低さ、③不確実性の大きさ、の3点に求め、交通流を解析するにはこれらによりもたらされる種々の特徴を念頭に置いておくべきことを指摘した。
- (2) 直線航路における航行船舶の方位角分布を実態観測調査資料より求め、これが平均値0°の正規分布とよい一致を見せることを示した。
- (3) 航行船舶の避航開始実態に関する解析を行い、同航船ならびに反航船に対する避航開始距離の分布が正規分布に従うことを示した。
- (4) 航路横断橋橋脚に対する航行船舶の避航動作を調べるため実態観測調査を行い、観測資料を解析することにより、避航開始地点と橋梁との距離の分布が対数正規分布で記述されることを明らかにした。
- (5) 避航船舶のみからなる同航船の航過距離に関する解析を行うとともに、この種の解析結果が確定値としては表わし難い性格のものであることを示した。
- (6) これまで明らかにされている交通流特性のうち、次章以降で用いるものについて整理し、船舶主要諸元間の関係を提示した。

しかるに、新たに解析された(2)~(4)の結果は、いずれもある定められた条件の下で求められたものであり、現段階では観測水域の特性を十分に分離したものとは言えない。これは、解析対象として適切な水域がさほど多くないためであり、今後、この点に関する資料の集積と研究が望まれる。したがって、ここで得られた結果を観測水域の特性と大きく異なる水域に適用する場合には、その妥当性をあらかじめ吟味しておくことが必要である。

また、(5)の結果についても同様のことが言え、航路幅が航過距離に及ぼす影響を分離しておくことが何よりも要請され、さらに、対象となった船舶がほとんど小型船であることも念頭に置いておかなければ

ばならない。本解析を通じて感じることは避航船舶と非避航船舶を区別することの困難さと、十分な数のサンプルを確保することの困難さである。後者は観測技術の発達に伴う省力化が解決することもあるが、前者に関する客観的な判断基準を設けることは今後とも極めて困難が予想される。そのため解析方法を根本的に検討し直すこともあるいは必要となつてこよう。このことについての1つの考え方が第4章で示される。

## 参考文献

- 1) 黒田・喜多・高橋：水路交差部における船舶衝突事故確率の推定，第5回土木計画学研究発表会講演集，pp.602～608，1983
- 2) 黒田・喜多・藤井：航路横断橋が船舶航行安全性に及ぼす影響，土木学会関西支部昭和58年度年次学術講演会講演概要集，pp.IV-35-1～2，1983
- 3) 喜多・黒田・河野：避航領域に着目した海上交通容量の一試算，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.141～142，1983
- 4) 黒田勝彦・喜多秀行：船舶衝突確率の推定モデル，土木学会論文報告集，No.339，pp.187～194，1983
- 5) 黒田勝彦・喜多秀行：航路横断橋に対する船舶衝突確率の推定モデル，土木計画学研究・論文集 No.1，pp.59～66，1984
- 6) 交通工学研究会編：交通工学ハンドブック，p.942，技報堂出版，1984
- 7) 運輸省第二港湾建設局・日本海難防止協会：東京湾船舶航行実態調査報告書，1976 ならびに運輸省港湾技術研究所設計基準部システム研究室調べ
- 8) 運輸省第三港湾建設局：シーバース計画調査報告書，pp.18～22，1974
- 9) 運輸省第三港湾建設局：航路再編成調査（航路容量調査）報告書，pp.36～40，1972
- 10) 山口篤利ほか：危険物等の離隔距離について，日本航海学会論文集，No.34，pp.59～64，1965
- 11) 日本海難防止協会・川崎市港湾局：京浜運河船舶交通調査報告書，1982
- 12) 藤井弥平：序説海上交通工学，海文堂出版，p.89，1971
- 13) 井上欣三：直線航路における航跡分布のモデル化と航路分離に関する一考察，日本航海学会論文集，No.58，pp.103～115，1977
- 14) 前出 12)，p.32
- 15) 藤井弥平ほか：水路の基本交通容量の一試算，日本航海学会誌，No.36，pp.7～14，1967
- 16) 原 潔：船舶交通の統計的特性-I，日本航海学会誌，No.36，pp.77～83，1966
- 17) 前出 12)

## 第3章 航路における船舶衝突確率の推定\*

### 3-1 概 説

前章第2節で述べたように、海上交通流においては、マクロな状態の変化が主として航行安全性に反映される。したがって、航行環境と当該環境の下での海上交通流の状態を関連づけようとする際には、航行環境と航行安全性との関係を明らかにしておくことが有用である。ところで、航路上で発生する海難事故には、衝突、乗り揚げ、転覆、火災、機関故障、浸水などがあげられるが、これらのうち、航路計画に資することを目的とする立場からは衝突および乗り揚げといった交通事故的海難が重要であり、なかでも船舶相互の衝突事故は全海難件数の60%を占める<sup>6)</sup>。そこで、本章では航路の諸元や交通の状況などからなる航行環境と船舶衝突確率との関係を明らかにする。

解析に先立って、第2節で航路上での衝突確率に影響を及ぼす諸要因を整理し、第3節で船舶衝突確率の推定を取り扱った従来の研究を概観する。第4節では、まず横断船舶のない様な航路における船舶衝突確率を推定するためのモデルを開発する。モデルの開発に当っては、航路計画上操作可能な要因をできるだけ明示的に組み込むと共に、混雑時における船舶挙動の主要な局面である避航動作を考慮しうよう留意して進められる。この2つの特徴のうち、特に前者を強調する意味で、このモデルを操作性船舶衝突確率推定モデル (Operational Ship Collision Probability Model : 以下、OSHCOP-モデル) と名づける。第5節では横断船舶が存在する航路交差部においても衝突確率の推定が可能となるようOSHCOP-モデルの拡張が図られる。さらに、第6節では、近年増加の一途をたどっている航路横断橋が存在する場合へと、モデルの再構築を行う。これら3つのモデルは、一般的な形状をした航路における船舶衝突確率を求める際にそれぞれの結果を重ね合わせることができるように、一貫した開発思想の下で構築が進められる。第7節は、以上のモデルの現象説明力を検証する部分である。検討はいくつかの本邦主要狭水道における過去の衝突確率の実績値と、同一条件下でモデルにより計算された推定値を比較することによってなされる。この検討を通じて本章で開発するモデルの有効性が示されるが、推定プロセスにまったく問題が残らないわけではないため、第8節でこれらに関する議論を行ない、第9節で得られた結果をとりまとめる。

### 3-2 衝突確率に影響を及ぼす要因

一般に、海難は自然条件、交通条件、航路条件、船舶条件と運航者条件が相互に関連して生ずると考えられる<sup>7)</sup>。これらを著者はそれぞれ、自然条件、交通特性、航路特性、船舶特性、および操船者特性と

---

\* 本章における研究の一部は文献1)～5)として発表している。



呼び、そこに含まれる諸要因を表3-1のように分類した。航路によっては、防波堤の設置などにより波浪や潮流といった一部の自然条件も操作可能となる場合があるが、一般には、航路特性と交通特性の一部が航路計画上の操作変数となり得る。すなわち、交通特性の一部は航行規制の形で変更が可能であり、航路特性は障害物の除去、航路の浚渫・拡幅、航路標識の整備などといったように、限度はあるにせよ人為的に行い得る。このために、航路計画上の操作変数と衝突確率との関係が、定量的にかつ相互作用を考慮しうる形で明らかにされる必要がある。

表3-1 衝突確率に影響を及ぼす要因

	Channel Characteristics		Traffic Characteristics	
	1. Fairway Width 2. Fairway Length 3. Depth 4. Curvature 5. Fairway Crossing 6. Navigation Mark 7. Obstacles 8. Channel Side Shape etc.		1. Ship Size Distribution 2. Sailing Velocity Distribution 3. Total Traffic Volume 4. Traffic Volume Ratio in Different Directions 5. Crossing Traffic Volume 6. Wake Position 7. Headway Distribution etc.	
Operational				
	Navigators Characteristics	Ship Characteristics	Natural Conditions	
	1. Quality 2. Illegal Sailing 3. Bad Watching 4. With or Without Pilot etc.	1. Ship Size 2. Speed Performance 3. Steering Performance 4. Stopping Performance 5. Radar Equipment etc.	1. Tidal Stream 2. Wave 3. Sight Distance 4. Wind Direction 5. Wind Force 6. Weather 7. Time etc.	
Non-Operational				

### 3-3 船舶衝突確率の推定を扱った従来の研究

船舶衝突確率の推定に関する従来の研究は、ある要因と事故率との単相関を統計的に整理したものがほとんどであり、航路の計画・設計に直接適用しうる形でシステムティックな分析を行った研究は、シミュレーションによる杉崎ほか<sup>8)</sup>、木俣・石崎<sup>9)</sup>、待ち行列理論の適用を図った原<sup>10), 11)</sup>、航路外へ出る際の衝突確率を扱ったCurtis<sup>12)</sup>、出会い確率までを求めた藤井<sup>13)</sup>、Lewisson<sup>14)</sup>、以外には見当たらない。シミュレーションによる分析は演算時間と演算費用の制約を受け、原のモデルは交通諸特性が有

するばらつきが到着時間間隔を除いて明示的に考慮されていない。一方、Curtisは同航船の前方を回り込んで航路を横切るという特殊な状態のみを扱うものであり、一般的な交通条件に対しては適用できない。また、Lewisson、藤井についても避航動態が考慮されておらず、出会い確率と衝突確率の間の理論的な関連づけにも欠ける。

なお、道路における交通事故分析の手法として、近年、交通錯綜技法（Traffic Conflicts Technique）の開発が進められている。<sup>15), 16)</sup> ここで言う交通錯綜とは、運転者が他の車に対して衝突の危険を感じ、制動や車線変更により危険を回避することを意味するもので、交通錯綜技法は、交通錯綜頻度と事故発生回数とを対比することにより事故危険度を分析しようとするものである。この手法の基本的な考え方は、潜在的な事故発生頻度とその顕在化率の分析という点で後に示すOSHICOPモデルの考え方に通じるものがあるが、錯綜発生地点が動線の交点上に限られていること、および錯綜の発生頻度と事故危険度との関連づけの面で議論が残っていることなどの理由により、現段階における船舶衝突事故分析への適用は困難である。

### 3-4 単路部における船舶衝突確率推定モデル

#### 3-4-1 モデルにおける推定プロセス

図3-1は本モデルによる1隻1トリップあたり衝突確率および航路全体がもつ平均的衝突危険度を推定するプロセスを示したものである。表3-1に示した船舶衝突に関連する諸特性のうち、モデルに入力されるものは航路特性と交通特性ならびに船舶特性であり、自然条件および操船者特性は、平均的な状態あるいはばらつきの程度が、観測値として取り込まれている交通特性に反映されているものと考えている。

まず、交通特性、航路特性と船舶特性から2船間の避航失敗確率(①)および航路内での出会い確率(②)を算定し、両者から2船間の船型別基本衝突確率(③)を求める。一方、交通特性から着目船が航路を通過する際に会合する可能性のある船舶の隻数(④)を求めておく。ここまではすべて出会いの形態別(行き合い、追い越し、被追い越し)および両船の船型別に計算される。そして、(③)と(④)からある船型の船舶1隻が航路内で衝突する確率(⑤)を求め、これを船型に関する期待値演算を行うことにより、航路における船舶衝突危険度(⑥)を得る。

#### 3-4-2 モデルの前提と避航動態のモデル化

解析対象とする航路は延長 $L_c$ 、幅 $W$ の様な両側通行航路である。この航路上を、避航時を除いて船舶は航路と平行に独立して直進し、横切り船舶の存在はないものとする。図3-2に示すように、船舶は船幅 $B$ を直径とする円で表現され、この円が一部でも重なった場合を「衝突」、避航動作を取ることなくそのまま進めば衝突に至る位置関係にある場合を「出会い」と定義する。なお、避航の対象とな

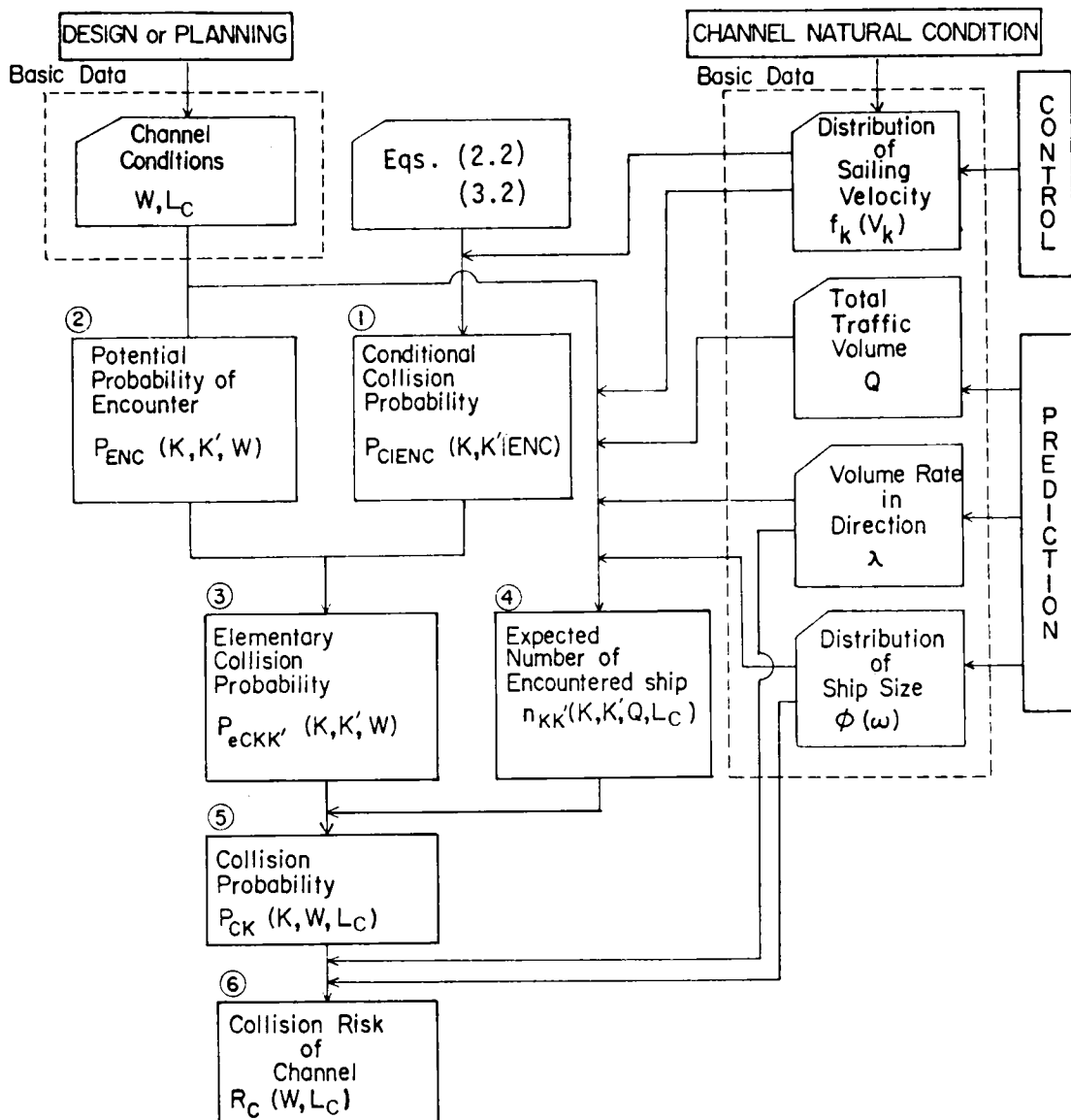


図3-1 本モデルにおける推定プロセス

る相手船は着目船の進路の延長線上を航行し、この線上で出会うとの仮定を設けている。

避航の形態は行き合い、追い越し、被追い越しの3種類を考え、それぞれ反航船、着目船より速度の遅い同航船、着目

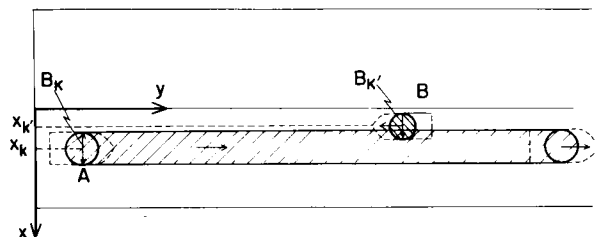


図3-2 水路内での2船の出会い

船より速度の速い同航船との避航に対応する。行き合いの場合(図3-3(a))は両船同時に避航を開始し、追い越しの場合(図3-4(a))は追い越しをかける船のみが避航動作をとる。避航に伴う航跡は折れ線で表現し、その時の変針角を $\theta$ とする。避航中に両船が接するような相互の位置関係は、これ以上避航開始が遅れば避航動作を取ったとしても衝突に至る位置関係でもあるため、このような状態における避航開始時点の両船の距離を限界避航開始距離、 $l^*$ 、と呼ぶ(図3-3(b), 図3-4(b))。

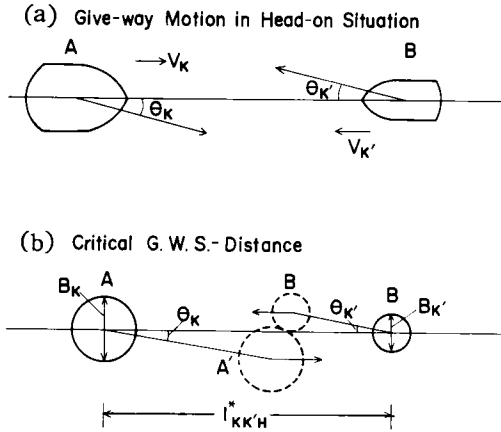


図3-3 行き合い時の避航動態

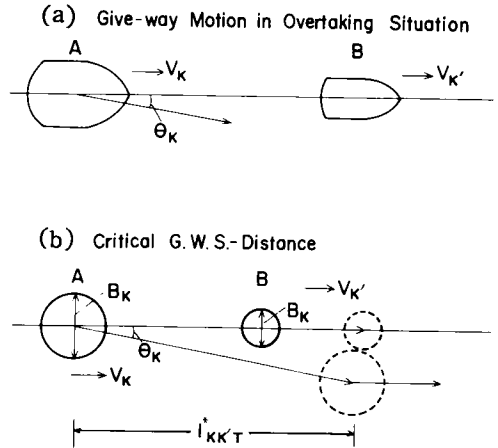


図3-4 追い越し時の避航動態

### 3-4-3 基本衝突確率

2-4で示したように、船舶相互の避航開始距離分布は、同航時・反航時とも正規分布で近似することができる。

一方、前項で述べた限界避航開始距離、 $l^*$  は、変針角 $\theta$ が一定であるとし、衝突直径(船舶 $k, k'$ の中心間距離がこの円の直径より小さい場合は衝突を意味する) $D_{kk'}$ を

$$D_{kk'} = (B_k + B_{k'}) / 2 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

と定義すれば、幾何学的関係から

$$\left. \begin{aligned} l_{kk'H}^* &= \frac{D_{kk'}}{\sin \theta} \\ l_{kk'T}^* &= D_{kk'} \cdot \frac{(V_k^2 + V_{k'}^2 - 2 V_k V_{k'} \cos \theta)^{1/2}}{V_k \sin \theta} \\ l_{kk'O}^* &= D_{kk'} \cdot \frac{(V_k^2 + V_{k'}^2 - 2 V_k V_{k'} \cos \theta)^{1/2}}{V_{k'} \sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} &\text{ただし, } V_k \cos \theta > V_{k'} \\ &\text{ただし, } V_k < V_{k'} \cos \theta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

と表わされる。避航失敗確率は避航開始距離  $l$  が限界避航開始距離  $l^*$  より短い事象の確率であるので、  
 出会いの条件下での 2 船の衝突確率は、

$$\left. \begin{aligned} P_{CH|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) &= \text{Prob.} [l_{kk'H} \leq l_{kk'H}^* | \text{Encounter}] \\ P_{CT|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) &= \text{Prob.} [l_{kk'T} \leq l_{kk'T}^*, V_k \cos \theta > V_{k'} | \text{Encounter}] \\ P_{COL|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) &= \text{Prob.} [l_{kk'O} \leq l_{kk'O}^*, V_k < V_{k'}, \cos \theta | \text{Encounter}] \end{aligned} \right\} \dots (3.3)$$

で与えられる。本来、避航失敗確率は出会い時の 2 船間の中心間隔により異なるはずのものであるが、  
 先に示したように、本モデルでは出会いが着目船進路の延長線上で生ずるとの仮定を設けているため、  
 2 船の相対位置には依存せず、船型と速度のみから規定される。

次に、航路内での出会い確率を求める。図 3-2 に示したように、航路に直角な方向に X 軸を取り、  
 着目船と相手船の X 軸方向の位置を  $x_k, x_{k'}$  とし、相対距離  $L_{kk'}$  を、

$$L_{kk'} = x_k - x_{k'} \dots \dots \dots (3.4)$$

とおくと、出会いの条件は次式で与えられる。

$$-D_{kk'} \leq L_{kk'} \leq D_{kk'} \dots \dots \dots (3.5)$$

航路を航行する船舶の航行位置分布が正規分布と良い一致をみせ、その平均値と航路中央との距離  $\mu_x$ 、  
 標準偏差  $\sigma_x$  が (2.12) 式で表わされることは井上<sup>17)</sup>によって報告されている。

この結果から、対航 2 船および同航 2 船の相対距離  $L_{kk'}$  の分布  $f_H(L_{kk'})$ 、 $f_T(L_{kk'})$  は、次式の  
 正規分布で近似できることが導かれる。

$$\left. \begin{aligned} f_H(L_{kk'}) &= N(2aW, \sigma_{x_k}^2 + \sigma_{x_{k'}}^2) \\ f_T(L_{kk'}) &= N(0, \sigma_{x_k}^2 + \sigma_{x_{k'}}^2) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.6)$$

ここに、 $\sigma_{x_k}^2, \sigma_{x_{k'}}^2$  は着目船、相手船の進行方向の航行位置分布の分散である。式 (3.5) と式 (3.6) よ  
 り、船型  $k, k'$  の 2 船に対する出会い確率は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} P_{ENC}^H(k, k') &= \int_{-D_{kk'}}^{D_{kk'}} f_H(L_{kk'}) dL_{kk'} \\ P_{ENC}^T(k, k') &= \int_{-D_{kk'}}^{D_{kk'}} f_T(L_{kk'}) dL_{kk'} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.7)$$

式(3.3)および式(3.7)で与えられる避航失敗確率と出会い確率の積として、3種の避航形態についての船型別基本衝突確率は次式で表わされることになる。

$$\left. \begin{aligned} P_{eCH}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CH|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) \cdot P_{ENC}^H(k, k') \\ P_{eCT}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CT|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) \cdot P_{ENC}^T(k, k') \\ P_{eCO}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CO|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) \cdot P_{ENC}^T(k, k') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.8)$$

#### 3-4-4 出会い状態の隻数分布

前に、「出会い」は2船が衝突直径内で遭遇する状態を定義したのに対し、「出会い状態」とは以下の状態をいう。すなわち、着目船が航路内で行き合い、追い越し、および被追い越しの状態になることをいい、「出会い状態の隻数」とは、着目船がこれらの状態で遭遇する相手船舶の総隻数をいう(図3-5の船舶AとBの間にある総隻数)。ここでは、これら3つの状態での隻数分布の求め方について述べる。

方向別交通量比を $\lambda$ とすると、方向別の交通量は $Q_1 = \lambda Q$ 、 $Q_2 = (1 - \lambda) Q$ で与えられる。2-6-1で示したように、通常の交通量における船型構成分布は、垂線間長の常用対数 $\omega$ を用いて、 $\phi(\omega) = N(\mu_\omega, \sigma_\omega^2)$ なる正規分布で近似できる。したがって、船型 $k$ の方向別期待交通量 $Q_{1k}$ 、 $Q_{2k}$ は次式で与えられる。

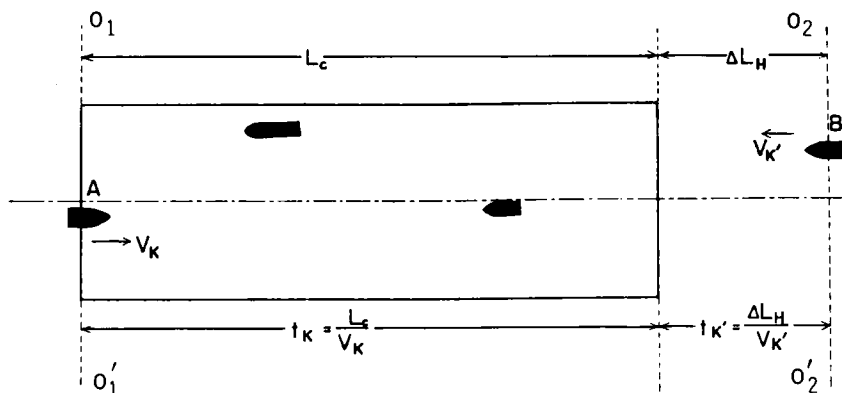
$$\left. \begin{aligned} Q_{1k} &= \lambda Q \phi(\omega_k) \\ Q_{2k} &= (1 - \lambda) Q \phi(\omega_k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.9)$$

今、図3-5(a)に示すように、航路端 $O_1 O_1'$ に到着した速度 $V_k$ の船Aが、 $L_c + \Delta L_H$ 離れた位置を航行する速度 $V_{k'}$ の反航船と航路内で行き合う条件は、

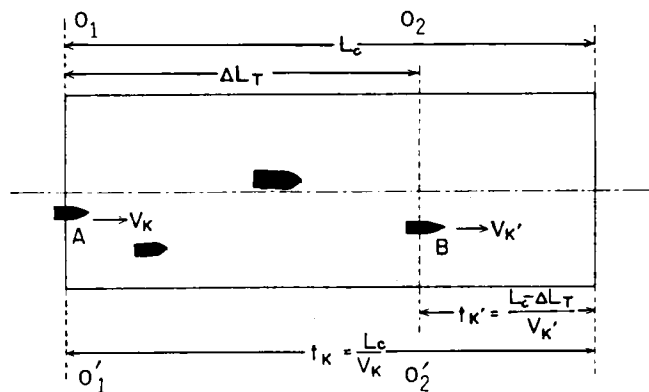
$$\Delta L_H \leq L_c \frac{V_{k'}}{V_k} \dots\dots\dots (3.10)$$

である。したがって、船Aが航路を通過する間に行き合う可能性のある船舶数は、船Aが航路端に到着した瞬間に航路端から $L_c + \Delta L_H$ の間に存在する船舶数である。船Bが $L_c + \Delta L_H$ を進むに要する時間 $\delta t_H$ は、

a) Head-on



b) Overtaking



c) Overtaken

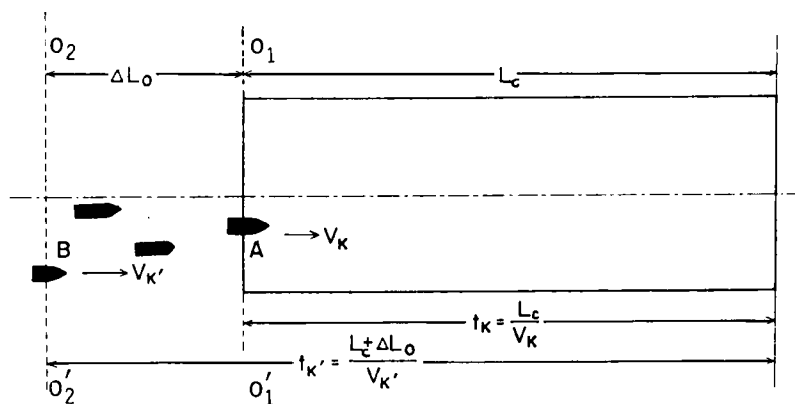


図 3-5 船舶 A, B が会うための最長距離

$$\delta t_H = \frac{L_C + \Delta L_H}{V_{k'}} = L_C \left( \frac{1}{V_{k'}} + \frac{1}{V_k} \right) \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

で与えられる。2-6-4に示したように、定常交通流において任意の時間内に見通し線  $O_2 O'_2$  に到着する隻数はポアソン分布とみなせるので、ある時間間隔  $\delta t_H$  に  $O_2 O'_2$  を通過する船型  $k'$  の船の隻数を  $n_{Hkk'}$  とすると、その確率は次式で与えられる。

$$P(n_{Hkk'}) = \frac{(Q_{2k'} \cdot \delta t_H)^{n_{Hkk'}}}{n_{Hkk'}!} \cdot e^{-Q_{2k'} \cdot \delta t_H} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

同様に、追い越し、被追い越しの場合についても図4-5 (b), (c)を参照して、着目船が出会い状態となる船舶数が  $n_{Tkk'}$ ,  $n_{Okk'}$  である確率  $P(n_{Tkk'})$ ,  $P(n_{Okk'})$  は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P(n_{Tkk'}) &= \frac{(Q_{1k'} \cdot \delta t_T)^{n_{Tkk'}}}{n_{Tkk'}!} \cdot e^{-Q_{1k'} \cdot \delta t_T} \\ \delta t_T &= L_C \cdot \left( \frac{1}{V_{k'}} - \frac{1}{V_k} \right) \\ P(n_{Okk'}) &= \frac{(Q_{1k'} \cdot \delta t_O)^{n_{Okk'}}}{n_{Okk'}!} \cdot e^{-Q_{1k'} \cdot \delta t_O} \\ \delta t_O &= L_C \cdot \left( \frac{1}{V_k} - \frac{1}{V_{k'}} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

### 3-4-5 航路における衝突危険度

船舶が航路内で衝突する確率は、衝突することなく航路を通過する事象の余事象の確率として計算される。行き合い状態の全ての船舶に対し衝突しない確率  $P_{SHkk'}$  は、

$$P_{SHkk'} = \sum_{n_{Hkk'}=0}^{\infty} [1 - P_{eCH}(k, k')]^{n_{Hkk'}} \cdot P(n_{Hkk'}) \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

であるが、 $P_{eCH}(k, k') \ll 1$  (後に示す試算では  $10^{-3}$  のオーダー) であるので、上式は次式のように簡単にすることができる。

$$\begin{aligned} P_{SHkk'} &= \sum_{n_{Hkk'}=0}^{\infty} [1 - n_{Hkk'} \cdot P_{eCH}(k, k')] \cdot P(n_{Hkk'}) \\ &= 1 - \overline{n_{Hkk'}} \cdot P_{eCH}(k, k') \quad \dots\dots\dots (3.15) \end{aligned}$$

上式において、 $\overline{n_{Hkk'}}$  は船型  $k$  の船と出会い状態になる船型  $k'$  の反航船の平均隻数である。同様に、追い越し状態および被追い越し状態での非衝突確率  $P_{STkk'}$ ,  $P_{SOkk'}$ , もそれぞれ次式のごとくなる。



$$\begin{aligned} P_{STkk'} &= 1 - \overline{n_{Tkk'}} \cdot P_{eCT}(k, k') \\ P_{SOkk'} &= 1 - \overline{n_{Okk'}} \cdot P_{eCO}(k, k') \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

ここで、2-6で示したように、同一船型であってもその航行速度は正規確率変数として考えられるので、その確率密度関数を、 $f(V)$ とすると、期待される非衝突確率はそれぞれ式(3.17)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \overline{P_{SHkk'}} &= \int_0^\infty \int_0^\infty P_{SHkk'} f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \\ \overline{P_{STkk'}} &= \int_0^\infty \int_0^{V_k \cos \theta} P_{STkk'} f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \\ \overline{P_{SOkk'}} &= \int_0^\infty \int_{V_k / \cos \theta}^\infty P_{SOkk'} f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

ある船型 $k$ の船舶が衝突することなく航路を通過する確率は、すべての避航形態、すべての船型に対して衝突しない確率であるから、船型 $k$ の船舶の期待衝突確率 $P_{Ck}$ は、

$$P_{Ck} = 1 - \int_{k'} \{ \overline{P_{SHkk'}} \cdot \overline{P_{STkk'}} \cdot \overline{P_{SOkk'}} \} \cdot \phi(\omega_{k'}) d\omega_{k'} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

で与えられる。上式は、船型 $k$ なる着目船が航路 $L_c$ をある方向(交通量 $\lambda Q$ の方向)に通過する際に期待される平均衝突確率である。

以上より、ある交通特性を考えたとき、所与の航路でのある方向の1トリップ当りの平均的な衝突確率 $P_c$ は、次式で与えられる。

$$P_c = \int_k P_{Ck} \phi(\omega_k) d\omega_k \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

上式は、一定の交通特性のもとで、ある航路で期待される衝突危険度を示すもので、その航路の航行安全性を示す一つの指標と考えることができる。

### 3-5 交差点における船舶衝突確率推定モデル

#### 3-5-1 モデルの前提と避航動態のモデル化

解析の対象とする航路は、図3-6に示す。長さ $L_{c1}$ 、幅 $W_1$ および長さ $L_{c2}$ 、幅 $W_2$ の2本の一様な航路が角度 $\phi$ で交差している航路区間である。この航路上を、避航時を除いて船舶は航路と平行に一定速度で航行し、その航行はお互いに他と独立であるものとする。横切り船舶との衝突を論じる際には船幅の影響は小さいと考え、垂線間長 $L$ をその長さとする線分で船舶を表現し、線分の船首側端点をもってその船舶の位置とする。この線分が一部でも重なった場合を「衝突」、避航動作をとることなくそのま

ま進めば衝突に至る  
位置関係にある状態  
を「出会い」と定義  
する。

交差する2船が出  
合った時、どちらか  
の航路に優先指定が  
ない限り、相手船を  
自船の右舷に見る船  
舶（義務船）のみが  
相手船の船尾側へ右  
転するように避航動  
作をとり、自船の左

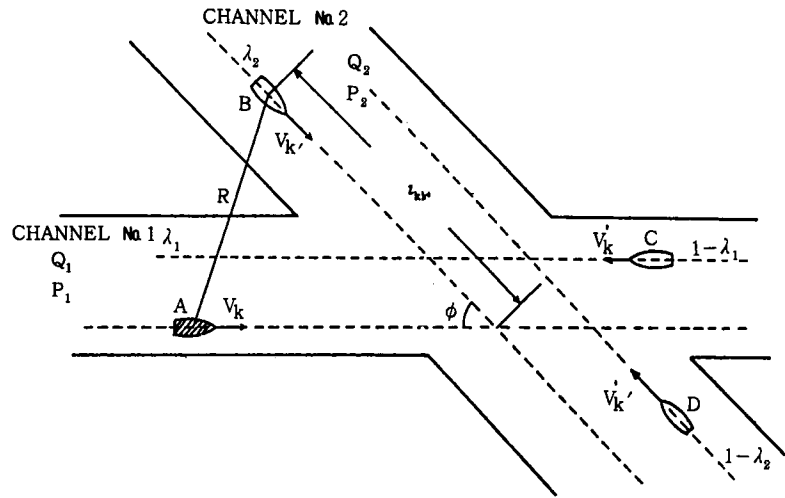


図3-6 解析対象航路の概念図

舷に相手船を見る船舶（保持船）は速度、進行方向とも変更しないものとする。これは一般水域における避航方法を規定した海上衝突予防法に基づいている。また、避航操船に際して機関の操作や投錨は行わず、変針のみによるものと仮定する。変針に伴う航跡の変化は折れ線で近似し、変針角  $\theta$  は一定とする。なお、時として2隻以上の船舶が同時に出会う場合（多重遭遇）が生じ、その一例を図3-7に示す。現行の海上衝突予防法に従えば、図中の船舶Aは、船舶Cに対して速度および進行方向を保持すると同時に船舶Bに対して避航動作を取らねばならないこととなり、實際上避航は状況に応じた各船舶の判断に委ねられているのが現状である。従って、規範的な避航動作の記述も困難となるため、本研究では多重遭遇を考慮せず、 $n$  隻との出会いは1隻対1隻の出会いが  $n$  回生じたものと見なす。

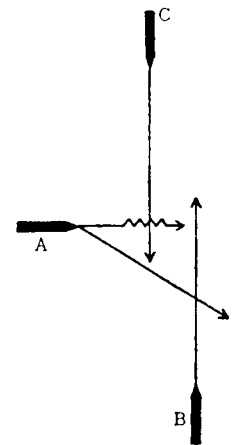


図3-7 多重遭遇の一例  
(文献18)より転載)

船舶は航路を航行する際、地形、潮流、航行規制などを考慮して一定のコースラインを設定し、それに沿って航行しようとする。航行中に他の船舶と衝突する可能性が生じた場合には、これを避航することによって危険な状態を脱しようとするが、何らかの原因（前方不注意、操船ミス等）により相手船を完全に避航しきれないと衝突に至る。

図3-8に、本モデルによる1隻1トリップ当りの衝突確率を推定するプロセスを示す。モデルへの入力は航路特性、交通特性、ならびに船舶特性であり、気象、海象等の自然条件と操船者特性は、先に

述べたように、その平均的な状態あるいはばらつきの程度が、観測値として取り込まれている船舶挙動に反映されているものと考えている。

まず、交通特性、航路特性、船舶特性から、2船間の避航失敗確率と交差点で出会う船舶の隻数が $n$ 隻である確率を、それぞれ出会い形態別、船型別、速度別に導く。ここに、出会い形態とは保持船としての出会いと義務船としての出会いを指す。そして、船型 $k$ 、速度 $V_k$ を有

する着目船が船型 $k'$ 、速度 $V_{k'}$ を有する相手船のどの1隻とも衝突することなく航路交差点を通過する確率を求め、その余事象の確率として航路交差点内での船型別、速度別衝突確率を求める。そして、着目船、相手船の船型、速度に関する期待値を取ることにより、任意船舶の平均的な衝突確率が得られ、これを航路交差点が有する衝突危険度とする。このようにして計算される航路交差点の衝突危険度と、前節で誘導した同航、反航船に対する衝突危険度から、解析の対象とする航路区間のもつ衝突危険度を求めることができる。

### 3-5-2 出会い隻数とその確率

先に述べたように、着目船Aが相手船Bと出会う際に、船Aが船Bに対して保持船(Stand-on Vessel)となる場合と義務船(Give-way Vessel)となる場合の2つの形態があり、以下、前者には添字S、後者には添字Gをつけて区別する。今、着目船が保持船である場合を考える。図3-9において、衝突が起こるとき、航路1を航行する船Aから見て最も早い時機(船Bがそれ以上早く通過すれば衝突しないという意味)にあたるのが(a)であり、最も遅い時機(船Bがそれ以上遅く通過すれば衝突しないという意味)にあたるのが(b)である。

図3-10の位置にいる船Aが船Bと衝突するまでに進む距離は、船Aと両船の進路の交点Oとの距離を $a$ 、船Aと船Bの船舶長を $L_k, L_{k'}$ として、それぞれ $a$ および $a+L_k$ である

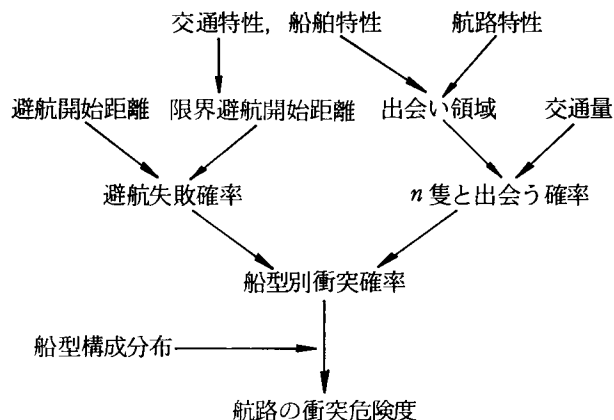


図3-8 衝突確率の推定プロセス

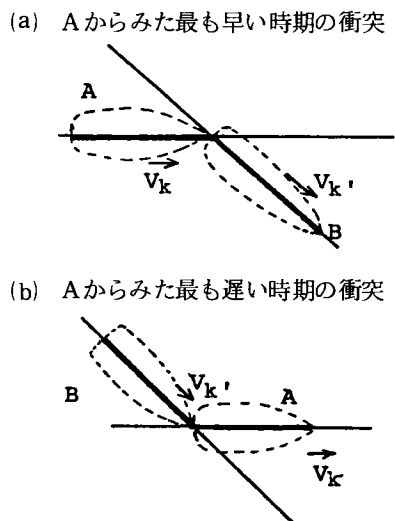


図3-9 衝突の時機と位置関係

から、図3-10の状態から図3-9(a),(b)の状態へ移る時間  $t_1, t_2$  は、

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= \frac{a}{V_k} \\ t_2 &= \frac{a + L_k}{V_k} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.20)$$

で与えられる。両船の進路の交点から船Bの船首までの距離を  $b$  とすれば、最も早い時期の出会いとなる船Bの位置  $b_1$  と、最も遅い時期の出会いとなる船Bの位置  $b_2$  は、それぞれ、

$$\begin{aligned} b_1 &= t_1 V_{k'} - L_{k'} = a \frac{V_{k'}}{V_k} - L_{k'} \\ b_2 &= t_2 V_{k'} = (a + L_k) \frac{V_{k'}}{V_k} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.21)$$

となる。ここに  $V_k, V_{k'}$  は船A, Bの速度である。これより、任意の位置を航行する船Aと航路交差部で出会う船は、両船の進路交点Oから距離  $b_1$  と  $b_2$  の間を航行している船であることがわかる(図3-11)。船Bの進路は航路2の航路幅方向の全ての位置をとりうるため、結局、図3-12に示す斜線の領域(以下、出会い領域と呼ぶ)に存在する船舶が交差部で船Aと出会うことになる。ここで、このようにして与えられる出会い領域の面積は、船Aと船Bの速度比と船舶船長、航路交差角のみから定まり、船Aの位置には依存しないことに注意しておく必要がある。

次に、出会い領域内に存在する船舶数を求めよう。航路上を航行する船舶がある見

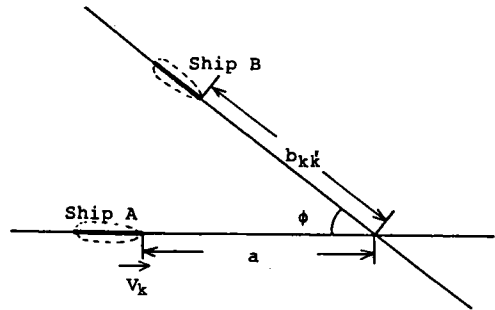


図3-10 進路交点までの距離

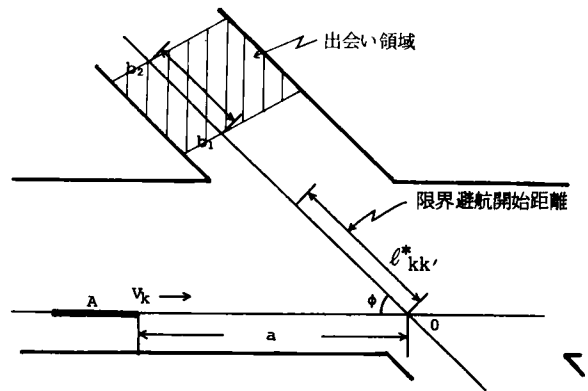


図3-11 出会い領域とその長さ

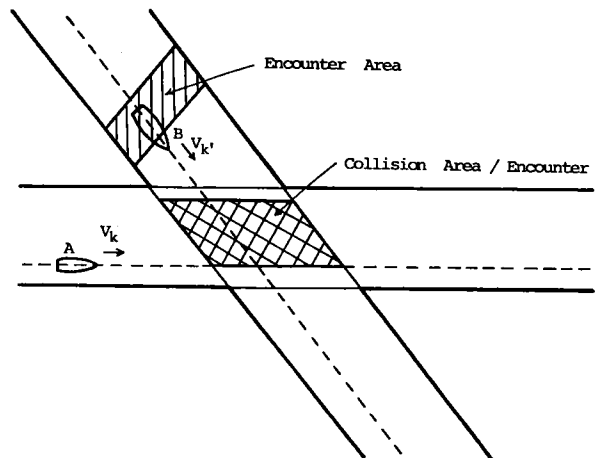


図3-12 出会い領域と衝突領域

通し線上に到着する到着時間間隔は、ポアソン分布に従うことを2-6-4で述べた。これに基づき、各船型別に見た船舶到着時間間隔の分布もポアソン分布に従うものと仮定する。船型  $k$  の着目船が船型  $k'$  の相手船  $n$  隻と出会う確率  $P_{ENC}(n | k, k', V_k, V_{k'})$  は、着目船の出会い領域に船型  $k'$  の船が  $n$  隻存在する確率であることは前に述べた。これは、

$$\delta t = \frac{b_2 - b_1}{V_{k'}} = \frac{L_k}{V_k} + \frac{L_{k'}}{V_{k'}} \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

で与えられる時間間隔  $\delta t$  に出会い領域の上流側の境界線上を船型  $k'$  の船が  $n$  隻通過する確率に等しい。したがって、船型  $k$ 、速度  $V_k$  の着目船 A が船型  $k'$ 、速度  $V_{k'}$  の相手船  $n$  隻と出会う確率  $P_{ENC}(n | k, k', V_k, V_{k'})$  は、船 A を保持船と考えているため添字 S をつけて、

$$P_{ENC}^S(n | k, k', V_k, V_{k'}) = \frac{\{\lambda_2 Q_2 \varphi_2(k') \delta t\}^n}{n!} e^{-\lambda_2 Q_2 \varphi_2(k') \delta t} \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

と計算される。ここに、 $\lambda_2$  は航路2における方向別交通量比（1方向交通量の全交通量に対する比）、 $Q_2$  は航路2の交通量、 $\varphi_2(k')$  は船型  $k'$  の船舶の全交通量に対する確率密度である。船型  $k$  を船舶長  $L_k$  で表わすと  $\omega = \log L_k$  は正規分布  $N(\mu_\omega, \sigma_\omega^2)$  に従う（2-6-1参照）。着目船 A が義務船となる場合は航路2を逆方向に航行する船舶を考えればよいから、方向別交通量比のみを変えて、次式となる。

$$P_{ENC}^G(n | k, k', V_k, V_{k'}) = \frac{\{(1-\lambda_2) Q_2 \varphi_2(k') \delta t\}^n}{n!} e^{-(1-\lambda_2) Q_2 \varphi_2(k') \delta t} \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

### 3-5-3 避航失敗確率

図3-13 は衝突の形態を示したものである。前節で述べた最も早い時期に衝突する船が衝突を回避するためには、船首が着目船の進路を横切る時点で、

$$d_{kk'}^S = L_k + \frac{V_k}{V_{k'}} L_{k'} \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

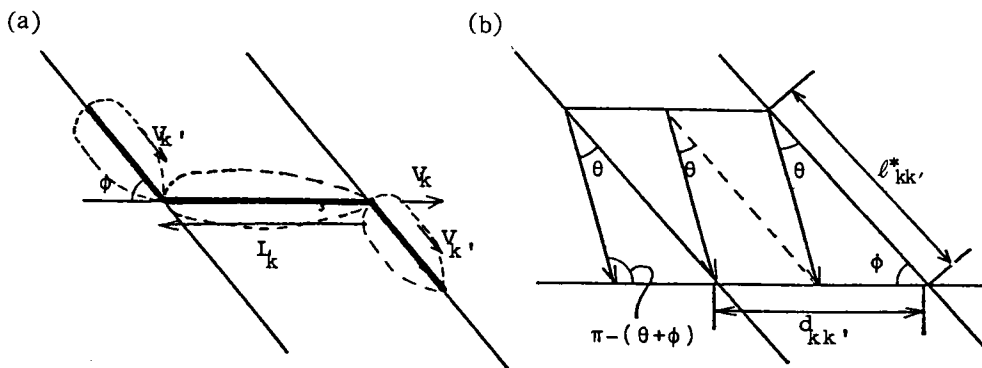


図 3-13 出会いの時機と避航航跡

だけ側方に変位させることが必要である。そこで船首と船尾が同じ航跡をたどるとして、避航航跡はb)のごとく示される。これより、避航のため側方に変位すべき距離は、2隻の出会いの時機に応じて0～ $d_{kk'}^S$ となり、その距離はランダムに定まる。そこで、平均距離 $d_{kk'}^S/2$ をもってこの距離を代表させる。変針角 $\theta$ のもとで、着目船の進路を横切る時点で $d_{kk'}^S/2$ 以上変位するために避航を開始しなければならない距離の最小値 $l_{kk'}^{S*}$ を限界避航開始距離と呼ぶことにすると、 $l_{kk'}^{S*}$ は、

$$\frac{l_{kk'}^{S*}}{\sin\{\pi-(\phi+\theta)\}} = \frac{d_{kk'}^S}{2\sin\theta} \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

なる関係と(3.25)式から

$$l_{kk'}^{S*} = \frac{\sin(\phi+\theta)}{2\sin\theta} \left( L_k + \frac{V_k}{V_{k'}} \right) L_{k'} \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

として与えられる。着目船Aを避航すべき相手船Bが、進路交点Oから距離0～ $l_{kk'}^{S*}$ の範囲で避航を開始しようとしても両船は衝突をまぬがれない。着目船Aが義務船のときは $\phi$ を $\pi-\phi$ とし、船型に関する添字 $k$ と $k'$ を交換して次式となる。

$$l_{kk'}^{G*} = \frac{\sin(\phi-\theta)}{2\sin\theta} \left( L_{k'} + \frac{V_{k'}}{V_k} \right) L_k \quad \dots\dots\dots (3.28)$$

次に、着目船Aを避航すべき相手船Bが避航に失敗し、衝突する確率を求めよう。

単路部における衝突確率のモデル化と同様に、交差部における避航失敗確率も避航開始距離 $l_{kk'}$ が(3.27)、(3.28)式で示される限界避航開始距離 $l_{kk'}^{S*}$ より短い確率であると考えられる。したがって、2-4-2で述べた交差船舶に対する避航開始距離分布 $f_l(l_{kk'}^S)$ 、 $f_l(l_{kk'}^G)$ を知ることにより、船型と速度がそれぞれ $k'$ 、 $V_{k'}$ の義務船が同じく $k$ 、 $V_k$ の保持船に出会った際の避航失敗確率 $P_F(k, k', V_k, V_{k'})$ は相手船の避航開始距離 $l_{kk'}^S$ が限界避航開始距離 $l_{kk'}^{S*}$ より小さい確率、および同じく $l_{kk'}^{G*}$ が $l_{kk'}^{G*}$ より小さい確率として次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P_F^S(k, k', V_k, V_{k'}) &= \text{Prob.} [l_{kk'}^S \leq l_{kk'}^{S*}] = \int_0^{l_{kk'}^{S*}} f_l(l_{kk'}^S) dl_{kk'}^S \\ P_F^G(k, k', V_k, V_{k'}) &= \text{Prob.} [l_{kk'}^G \leq l_{kk'}^{G*}] = \int_0^{l_{kk'}^{G*}} f_l(l_{kk'}^G) dl_{kk'}^G \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

#### 3-5-4 航路交差部における衝突危険度

航路交差部において、船型 $k$ の着目船(保持船)が船型 $k'$ の義務船と衝突することなく交差部を通過し終える確率 $P_{safe}^S$ は(3.29)式の避航失敗確率 $P_F^S(k, k', V_k, V_{k'})$ と(3.23)式の出会い隻数の確率 $P_{ENC}^S(n|k, k', V_k, V_{k'})$ より、

$$P_{safe}^S(k, k', V_k, V_{k'}) = \sum_{n=0}^{\infty} \{1 - P_F^S(k, k', V_k, V_{k'})\}^n \cdot P_{ENC}^S(n | k, k', V_k, V_{k'}) \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

で与えられる。ここで、 $P_F(k, k', V_k, V_{k'}) \ll 1$ であるので上式は次のように変形される。

$$\begin{aligned} P_{safe}^S(k, k', V_k, V_{k'}) &= \sum_{n=0}^{\infty} \{1 - n \cdot P_F^S(k, k', V_k, V_{k'})\} \cdot P_{ENC}^S(n | k, k', V_k, V_{k'}) \\ &= 1 - \lambda_2 Q_2 \phi_2(k') \delta t \cdot P_F^S(k, k', V_k, V_{k'}) \quad \dots\dots\dots (3.31) \end{aligned}$$

$\lambda_2 Q_2 \phi_2(k') \delta t$ は航路2を航行する船型 $k'$ の義務船の時間 $\delta t$ あたりの交通量である。着目船が義務船となる場合の非衝突確率 $P_{safe}^G(k, k', V_k, V_{k'})$ も同様に、

$$P_{safe}^G(k, k', V_k, V_{k'}) = 1 - (1 - \lambda_2) Q_2 \phi_2(k') \delta t \cdot P_F^G(k, k', V_k, V_{k'}) \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

で与えられる。したがって、船型 $k$ 、速度 $V_k$ の着目船が、交差航路を通行する船型 $k'$ 、速度 $V_{k'}$ のいずれとも衝突しない確率 $P_{safe}(k, k', V_k, V_{k'})$ は、次式の如く両者の積として得られる。

$$P_{safe}(k, k', V_k, V_{k'}) = P_{safe}^S(k, k', V_k, V_{k'}) \cdot P_{safe}^G(k, k', V_k, V_{k'}) \quad (3.33)$$

以上の議論は、ある特定の船型、速度を有する着目船と相手船についてなされてきたが、実際の船舶交通量では、船型、速度は広範囲にわたっている。それゆえ、横切り船舶に対する平均的な衝突危険度 $P_{C, cross}$ は全ての船型・速度の船舶が衝突しないという事象の余事象の確率として求めなければならない。そこで2-6で示した船型構成分布 $\phi(L)$ と船型別航行速度分布 $\phi(V_k)$ を用いると、横切り船舶に対する平均的な衝突危険度 $P_{C, cross}$ は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} P_{C, cross} &= 1 - \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \{1 - P_{safe}(k, k', V_k, V_{k'})\} \\ &\quad \phi_1(L_k) \phi_2(L_{k'}) \phi_1(V_k) \phi_2(V_{k'}) dV_{k'} dV_k dL_{k'} dL_k \quad \dots\dots\dots (3.34) \end{aligned}$$

なお、交差航路におけるトータルの衝突危険度 $P_C$ は、反航船と同航船に対する衝突危険度 $P_{C, straight}$ ならびに横切り船に対する衝突危険度 $P_{C, cross}$ より、次式で与えられる。

$$P_C = 1 - (1 - P_{C, straight}) (1 - P_{C, cross}) \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

### 3-6 航路横断橋への船舶衝突確率推定モデル

#### 3-6-1 対象航路と推定プロセス

解析の対象とする水路の概要を図3-14に示す。水路には、幅 $W$ の屈曲のない2方向航路が設定され、航行に支障をきたすことのない十分な水深を有しているものとする。横断橋は航路に直角に架設され、そのスパン長は $L_s$ 、航路側端から一定幅の緩衝帯を隔てて直径 $D_p$ の橋脚が設置されてい

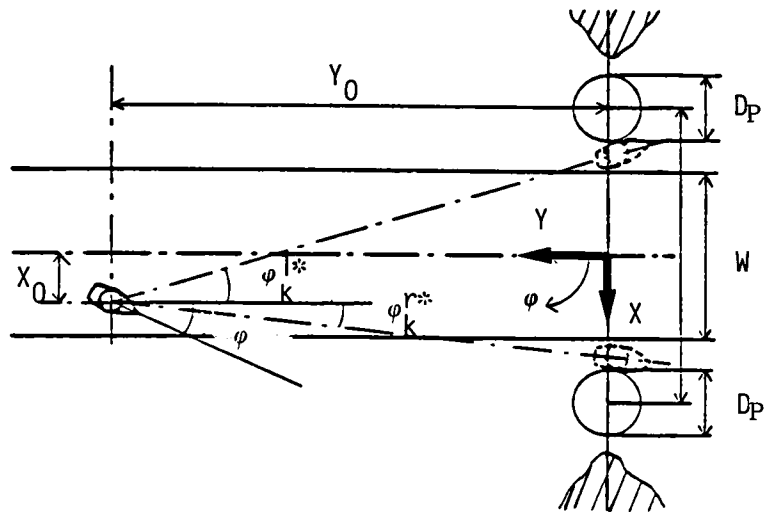


図3-14 対象航路と橋脚に対する出会い

る。航路内には障害物はないものとする。この航路上を交通量が $Q$ 、方向別交通量比が $\lambda$ 、船型構成分布の平均値と標準偏差がそれぞれ $\mu_w$ 、 $\sigma_w$ である船舶交通流が航行する。船舶は任意の方向に直進し、避航は一定の変針角 $\theta$ の変針によってのみ行うものと仮定する。また、簡単のため、船舶をその幅 $B$ を直径とする円で表現し、この円の中心の位置を船舶の位置と見なす。

以上の如き前提のもとで、本モデルでは、衝突に至るプロセスを「船舶と橋脚との出会い」と「橋脚への避航失敗」という2段階に分けてとらえる。すなわち、操船者は自船の進路上に危険があるか否かを判断しつつ航行している。そして、自船の位置とその方向から、橋脚との衝突に対して危険な状態にあると認識した場合には避航操船を行うのであるが、この時、既に回避できないほど橋脚に近づき過ぎていれば、衝突に至ると考えようとするものである。そこで、まず危険な状態としての「出会い」を定義する。次に、橋脚を回避しうるか否かを判定する基準として「限界避航開始距離」なる概念を導入し、これを船舶特性と航路特性から求める。そして、この限界避航開始距離と2-4で述べた避航開始距離分布から避航失敗確率を導き、先の「出会い」の状態となる確率と合わせて基本衝突確率を求める。これは、ある船型の船舶がこの航路を航行する際、橋脚に衝突する確率を意味するものであり、これをもとに、ある一定期間内の衝突事故発生確率と期待事故件数が得られる。以上の推定プロセスをフローチャートで示したものが図3-15である。



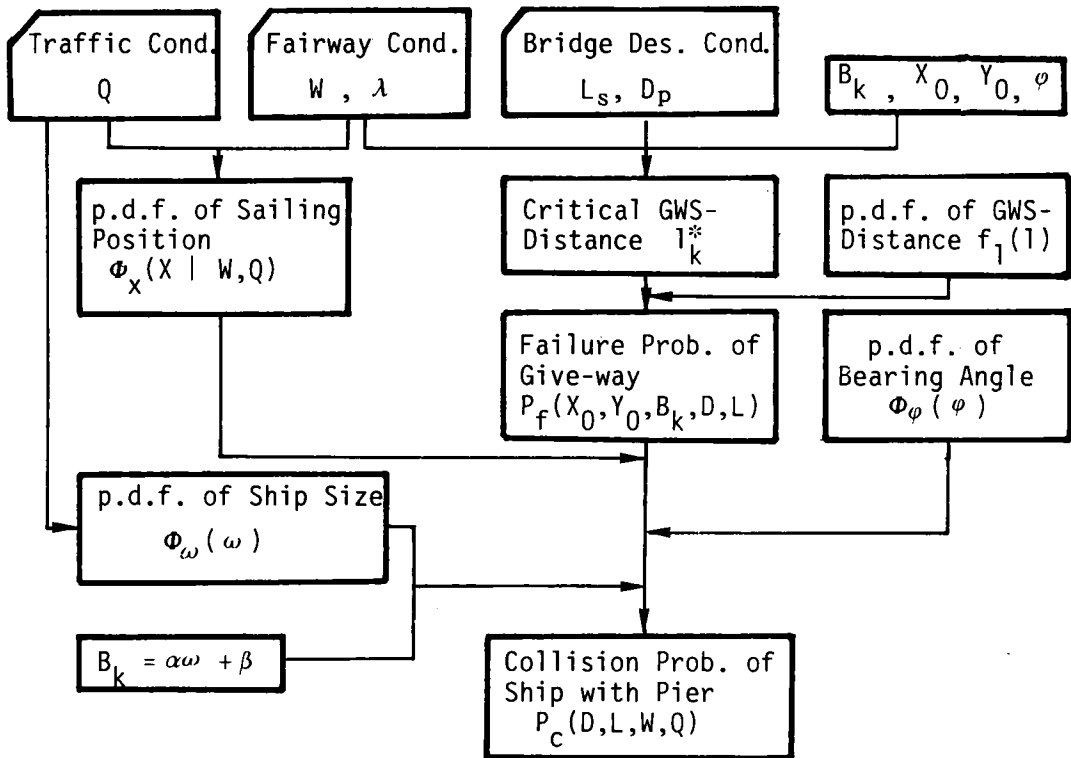


図3-15 モデルにおける推定プロセス

### 3-6-2 基本衝突確率

#### (1) 衝突と出合いの定義

先に、船舶を円で表現した。この円が橋脚と一部でも重なる状態を「衝突」と定義する。また、避航することなくそのまま直進すれば衝突に至るような位置に船舶がいることを「出合い」と定義すると、以下のように表現される。図3-14に示した如く座標軸を定め、位置 $(x_0, y_0)$ にいてY軸に対し $\varphi$ の方向を向いている幅 $B_k$ の船舶について考えると、この船舶が進行方向右側の橋脚の内側に接する場合の方位角を $\varphi_k^{r*}$ 、左側橋脚の内側に接する場合の方位角を $\varphi_k^{l*}$ として、

$$\left. \begin{aligned} \varphi \geq \varphi_k^{r*} &= -\tan^{-1} \frac{(x_0 - \frac{L_s}{2})}{y_0} - \sin^{-1} \frac{D_{ck}}{\sqrt{y_0^2 + (x_0 - \frac{L_s}{2})^2}} \\ \varphi \leq \varphi_k^{l*} &= -\tan^{-1} \frac{(x_0 + \frac{L_s}{2})}{y_0} - \sin^{-1} \frac{D_{ck}}{\sqrt{y_0^2 + (x_0 + \frac{L_s}{2})^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.36)$$

のとき、右側橋脚ないしは左側橋脚にそれぞれ出会いの状態にある。ここに、 $D_{ck} = (B_k + D_p)/2$  である。

## (2) 限界避航開始距離

まず、進行方向右側の橋脚に対する限界避航開始距離  $l_k^{r*}$  を導く。図3-16のごとく、 $t=0$  に点  $(x_0, y_0)$  上で方位角  $\varphi$  の方向を向いて右側橋脚に出会っている船型  $k$ 、速度  $V_k$  の船舶を考える。

この船舶が時刻  $t_s$  に避航を開始したとし、変針角を  $\theta_r (< 0)$ 、避航後の速度変化がないものとする、避航後の位置は、

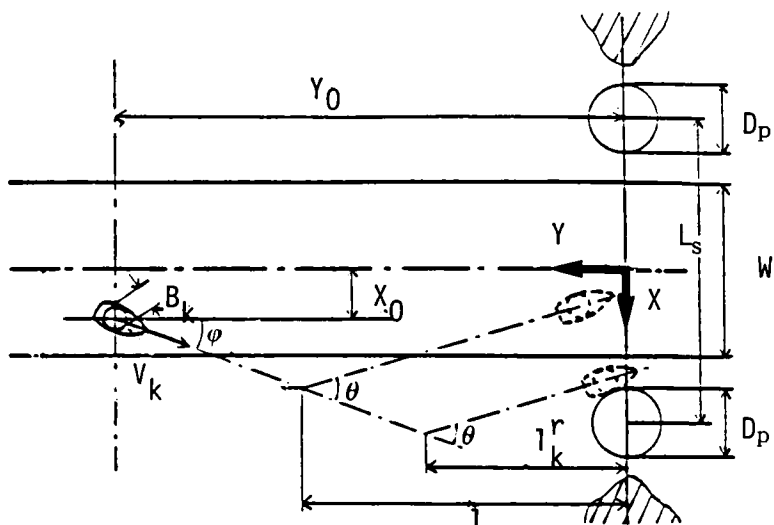


図3-16 避航動作と限界避航開始距離

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x_0 + V_k t_s \sin \varphi - V_k (t - t_s) \sin (\theta_r - \varphi) \\ y(t) &= y_0 - V_k t_s \cos \varphi - V_k (t - t_s) \cos (\theta_r - \varphi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.37)$$

となり、船舶中心と右側橋脚中心との距離の極小値  $d_r^*$  は、次式のように表わされる。

$$d_r^* = y_0 \sin (\theta_r - \varphi) - \left( x_0 - \frac{L_s}{2} \right) \cos (\theta_r - \varphi) - V_k t_s \sin \theta_r \dots\dots\dots (3.38)$$

$D_{ck} = (B_k + D_p)/2$  とすると、 $d_r^* < D_{ck}$  の場合が衝突を意味するため、 $d_r^*$  が  $D_{ck}$  に等しいと置くことにより、これより遅い時機に避航を開始しても橋脚を回避しきれないという限界避航開始時機  $t_s^*$  が求まる。この  $t_s^*$  を(3.37)式に代入すると、限界避航開始距離  $l_k^{r*}$  は次式で与えられる。

$$l_k^{r*} = (\sin \varphi + \cot \theta_r \cos \varphi) \left\{ y_0 \sin \varphi + \left( x_0 - \frac{L_s}{2} \right) \cos \varphi \right\} + D_{ck} \operatorname{cosec} \theta_r \cos \varphi \dots\dots\dots (3.39)$$

左側橋脚に出会う場合、避航後の船舶の時刻  $t$  における位置  $(x(t), y(t))$  は、式(3.37)において  $\theta_l = -\theta_r$  とし、橋脚の位置を  $(-L_s/2, 0)$  としたものとなるため、進行方向左側の橋脚に対する限界避航開始距離  $l_k^{l*}$  も同様の過程を経て、次式の如く与えられる。

$$l_k^{l*} = (\sin \varphi - \cot \theta_l \cos \varphi) \{ y_0 \sin \varphi + (x_0 + \frac{L_S}{2}) \cos \varphi \} + D_{ck} \operatorname{cosec} \theta_l \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (3.40)$$

(3) 避航失敗確率と基本衝突確率

本研究では、船舶が橋脚に近づきすぎた場合、すなわち、船型  $k$  の船舶の避航開始距離  $l$  が限界避航開始距離  $l_k^{r*}$  より短い場合に衝突に至ると考えることは先に述べた。したがって、出会いの状態にある船舶が橋脚に対する避航に失敗する確率は、 $l$  が  $l_k^{l*}$  より短い確率である。ここで  $l$  は (2.5) 式で示した対数正規分布に従うことが明らかとなっているため、避航失敗確率  $P_{fk}$  は、位置  $(x_0, y_0)$  と方位角  $\varphi$ 、船幅  $B_k$ 、橋脚直径  $D_p$ 、スパン長  $L_S$  の関数として、次式のごとく導かれる。

$$P_{fk}(x_0, y_0, \varphi, B_k, D_p, L_S) = \begin{cases} P_{rob.}[l \leq l_k^{r*}] = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^r / \sqrt{2})] & \text{for } \varphi | x_0, y_0 \geq \varphi_k^{r*}(x_0, y_0) \\ P_{rob.}[l \leq l_k^{l*}] = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^l / \sqrt{2})] & \text{for } \varphi | x_0, y_0 \leq \varphi_k^{l*}(x_0, y_0) \\ 0 & \text{for others} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.41)$$

ここに、

$$I_{ck}^r = \frac{\log l_k^{r*} - \mu_l}{\sigma_l}, \quad I_{ck}^l = \frac{\log l_k^{l*} - \mu_l}{\sigma_l}, \quad \operatorname{erf}(\xi) = \int_0^\xi \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} du$$

である。 $P_{fk}$  は、位置  $(x_0, y_0)$  で方位角  $\varphi$  をもって航行している船型  $k$  の着目船が式 (3.36) に示した出会いの条件下にあるときに、橋脚に対する避航を失敗する確率を与えることになる。

衝突は、船舶が橋脚と出会いかつ避航に失敗する場合に生起するのであるから、任意の位置を任意の方向に航行している船型  $k$  の着目船が橋脚と衝突する確率を船型別基本衝突確率  $P_{eck}$  と名付け、 $y_0$  としして航行船舶が避航を開始し始める点を選ぶと、 $P_{eck}$  は (2.11) 式の航行位置分布  $\phi_x(x)$ 、(2.1) 式の方位角分布  $\phi_\varphi(\varphi)$  および避航失敗確率  $P_{fk}$  を用いて、すべての航路幅方向航行位置と方位角に関する期待値を取ることにより、次式で与えられる。

$$P_{eck}(y_0, B_k, D_p, L_S, W, Q) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\pi/2}^{\varphi_k^{l*}} \{1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^l / \sqrt{2})\} \phi_\varphi(\varphi) d\varphi + \int_{\varphi_k^{r*}}^{\pi/2} \{1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^r / \sqrt{2})\} \phi_\varphi(\varphi) d\varphi \right] \cdot \phi_x(x | W, Q) dx \quad \dots\dots\dots (3.42)$$

$P_{eck}$  が  $B_k, D_p, L_s$  だけでなく,  $W, Q$  の関数ともなっているのは, 航行位置分布  $\phi_x(x)$  が  $W, Q$  に依存するためである。

### 3-6-3 橋脚への船舶衝突危険度と期待衝突事故件数

ここまでは, ある船型  $k$  の船舶 1 隻が橋脚に衝突する確率を論じてきた。次に上述の議論から導かれた船型別基本衝突確率  $P_{eck}$  を基に, ある一定期間に期待される橋脚への衝突事故件数を求める。

2-6 に示したように, 船幅  $B_k$  の常用対数と垂線間長の常用対数  $\omega_k$  とは船型関係で対応づけられる。従って, 船幅  $B_k$  の関数である基本衝突確率  $P_{eck}$  は, すなわち  $\omega_k$  の関数である。単位時間当たり交通量が  $Q$ , 方向別交通量が  $\lambda$  である航路における船型別単位時間当たり交通量  $Q_k$  は (2.10) 式より,

$$Q_k = \lambda \cdot Q \cdot \phi_{\omega}(\omega_k) d\omega_k \quad \dots\dots\dots (3.43)$$

で与えられる。この  $Q_k$  隻のうち  $N_k$  隻が橋脚に衝突する確率  $P(N_k)$  は, 船型別基本衝突確率  $P_{eck}$  を用いて,

$$P(N_k) = \binom{Q_k}{N_k} (1 - P_{eck})^{Q_k - N_k} \cdot P_{eck}^{N_k} \quad \dots\dots\dots (3.44)$$

である。これより, 船型  $k$  の船舶の期待衝突隻数  $\bar{N}_{ck}$  は,

$$\bar{N}_{ck} = P_{eck} \cdot Q_k \quad \dots\dots\dots (3.45)$$

と表される。 $Q_k$  は (3.43) 式の如く与えられているため, 交通量  $Q$  のうち橋脚に衝突する船舶の期待隻数  $\bar{N}_c$  は (3.42) 式を船型に関して積分することにより,

$$\bar{N}_c = Q \int_0^{\infty} P_{eck} \cdot \phi_{\omega}(\omega) d\omega \quad \dots\dots\dots (3.46)$$

として求められる。

## 3-7 モデルの現象説明力に関する検討

前節までに導いた航路における船舶衝突確率推定モデルの妥当性を検討するため, 我が国のいくつかの主要狭水道に対して試算を行い, 実績値と比較する。

### 3-7-1 単路部における船舶衝突確率推定モデルに対する検討

試算例とした狭水道は交通量・事故件数ともに大であり, 船型構成に占める大型船の比率が小さい浦賀水道, 明石海峡, 備讃瀬戸東部, 来島海峡の 4 か所である。

モデルへの入力となる航路特性, 交通特性は原<sup>11)</sup>に示されたものをそのまま用いる (表 3-2)。

表3-2 モデルの比較のための入力データ（航路，交通特性）

航 路 名	$L_c$	$W$	$Q$	$\mu_\omega$	$\sigma_\omega$	$\lambda$	$a$
明 石 海 峡	18.5	4.0	68.8	1.36	0.26	0.50	0.20
浦 賀 水 道	28.0	2.0	33.5	1.53	0.26	0.50	0.20
備 讃 東	35.7	2.0	44.5	1.43	0.20	0.50	0.20
来 島 海 峡	27.8	2.0	35.9	1.30	0.30	0.50	0.20

$L_c$  : 航路長 (km)

$W$  : 航路幅 (km)

$Q$  : 交通量 (隻/時)

$\mu_\omega$  : 船型構成分布の対数平均

$\sigma_\omega$  : 船型構成分布の対数標準偏差

$\lambda$  : 方向別交通量比

$a$  : 航行位置分布のパラメータ

表中に示した交通特性のうち，船型構成分布を規定するパラメーター  $\mu_\omega$  と  $\sigma_\omega$  は，日本海難防止協会<sup>19)</sup>による各狭水道における船型別交通量の観測結果を解析することにより求めた。方向別交通量比  $\lambda$  は時刻により変化するものであるが，1日単位で見した場合両方向ともほぼ交通量は等しいため，ここでは一律に0.5とした。

船舶特性については，船型別平均航行速度  $\mu_{V_k}$ ，船幅  $B_k$  を垂直間長  $L_k$  と関連づけて取り扱い，2-6-3に示したように規定されたとした。

また，航行速度分布の標準偏差  $\sigma_{V_k}$  は，2-6-3に示したように，すべての船型に対して2.78km/h (1.5 kt) とし，避航の際の変針角  $\theta$  は通常の避航動態を考慮して30°とした。

以上の入力データを用いて求めた船舶衝突確率の推定値と実績値との対応を示したものが図3-17である。実績値は日本海難防止協会<sup>19)</sup>による値を用いた。ここで，小型船，中型船，大型船がそれぞれ500 G.T. 未満，500～3000 G.T.，3000 G.T. 以上，に対応し，計算にあたっては，各船型ランクの平均垂線間長33.9m，66.5m，122.1mを有する船舶を代表船型として求めた。ここで示した衝突確率  $P_C$

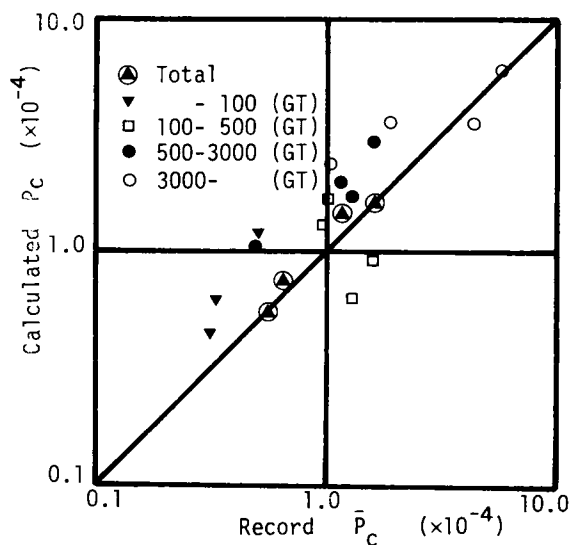


図3-17 推定値と実績値の比較（本モデル）

は1トリップ当りの衝突確率であり、単位は(回/トリップ)である。相対的にやや過大な推定となっているが、45°線にはほぼ沿っており、航路特性、交通特性がそれぞれ異なる各狭水道における船舶衝突確率をその特性と関連づけて説明し得たといえよう。したがって、本モデルを用いて航路の改良効果、すなわち、航路の改良による相対的な航行安全性の変化を予測することができる。

次に、本モデルの結果と、同一データで計算した従来のモデルの結果を比較する。なお各モデルの内容については簡単な説明にとどめたので、詳細は参考文献を参照されたい。

原のモデル<sup>10), 11)</sup>は、一連の避航を待ち行列系におけるサービスと考え、サービス時間に相当する平均避航所要時間( $1/\mu$ )と避航すべき相手船の到着時間間隔から計算される待ち時間が、避航開始時機( $\tau$ )より長くなる確率を衝突確率とするものである。先に用いた入力データ以外に用いた数値は原が示した値(表3-3)に従った。また、このモデルは航路の湾曲の影響も考慮しており、航路の平均湾曲角度 $\varphi_m$ だけ変針するために要する航走距離 $e$ は、 $\varphi_m$ 変針する際の新針路距離の2倍で代用した。その他の航路特性値も原の示すデータを用いている。図3-18が原のモデルによる推定値と実績値を対応させたものである。ただし、小型船の推定値の一部は $0.1 \times 10^{-4}$ 以下と極めて小さな値となるため図示していない。

表3-3 原のモデルによる計算に用いたパラメータ

パラメータ名	用いた値
使用舵角 $\delta$	15°
操舵速度	2.23(deg/s)
追従性指数 $T'$	2.5
施回性指数 $K'$	1.8
避航開始時機 $\tau$	3.5 (min)
平均避航所要時間 $1/\tau$	0.8 (min)

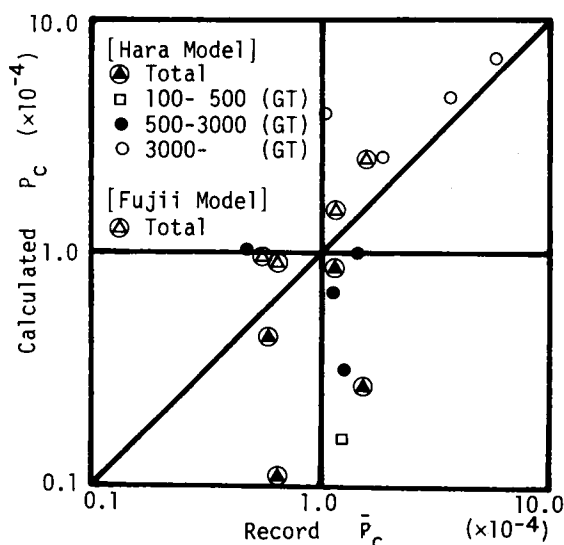


図3-18 推定値と実績値の比較(原モデル、藤井モデル)

藤井のモデル<sup>18)</sup>は、船舶の大きさと航行速度、出会い角度、船舶密度などから、船舶が避航することなく直進した場合に衝突する船舶数を幾何学的関係から求め、実績値に合うよう統計的な衝突直径なる概念を導入して補正するものである。同様の条件の下で計算した藤井のモデルによる推定値と実績値の対応を同じく図3-18に示す。ただし、計算の過程で用いる統計的な衝突直径は航路を航行する全船舶の平均船舶長に対して求められているため、ここでは全船型に対する値のみをプロットしてある。なお、計算に用いた統計的な衝突直径の値は、反航の場合 $3.0 \times 10^{-4} L$ 、同航の場合 $1.0 \times 10^{-4} L$ とした。<sup>20)</sup>

以上の結果を比較すると、数値的には図からも明らかなように、原のモデルは小型船について特に推定値が小さくなっている。これに比べ、藤井のモデルと本研究で提案したモデルは、どちらもやや過大な推定となっはいるものの、傾向的には現象をほぼ再現していると見ることができる。一方、モデルの性格の面では、原のモデルおよび筆者が提案したモデルは避航動態とその失敗確率を考慮したものである。さらに、原のモデルは航路の湾曲や多重遭遇をも考慮に含めた形となっているが、藤井のモデルは避航動態を考慮にいれず、補正率的な性格をもった統計的衝突直径なる概念を対応づけのため与えているにすぎない。したがって、藤井のモデルは船舶特性や操船者特性が変化した場合の危険度を予測するモデルとしては使用することが困難である。

このように、従来のモデルと比べ本研究で提案するモデルのほうが航路の改良計画や航行規制、さらには衝突防止機器の搭載といった多方面からの船舶衝突事故率低減方策の効果を定量的に把握するための道具として、現象説明力並びにモデルの性格の点で、より適切であると考えられる。

### 3-7-2 交差点における船舶衝突確率推定モデルに対する検討

交差点が航路指定されている備讃瀬戸東部および西部（図3-19）に対して本モデルを適用し、衝突危険度を求めた。ただし、東部では備讃瀬戸東航路（両側通行）が宇高東航路ならびに宇高西航路（それぞれ片側通行）と、西部では備讃瀬戸北航路（片側通行）が水島航路（両側通行）と交差するものとして衝突確率を求め、備讃瀬戸南航路は、交差のない航路として扱った。また、交差点における右左折船舶は、全交通量に占める割合が少ないことでもあり、今回は考慮しないものとする。モデルへのインプット・データを表3-4に示す。なお、備讃瀬戸東部・西部とも海上交通安全法（一般法である海上衝突予防法に対し特別法となる）による最高速度制限と優先指定がなされているため、計算にあたっては、

①最高速度制限は宇高東航路、西航路を除き12ノットである。

②備讃北航路は水島航路に優先する。

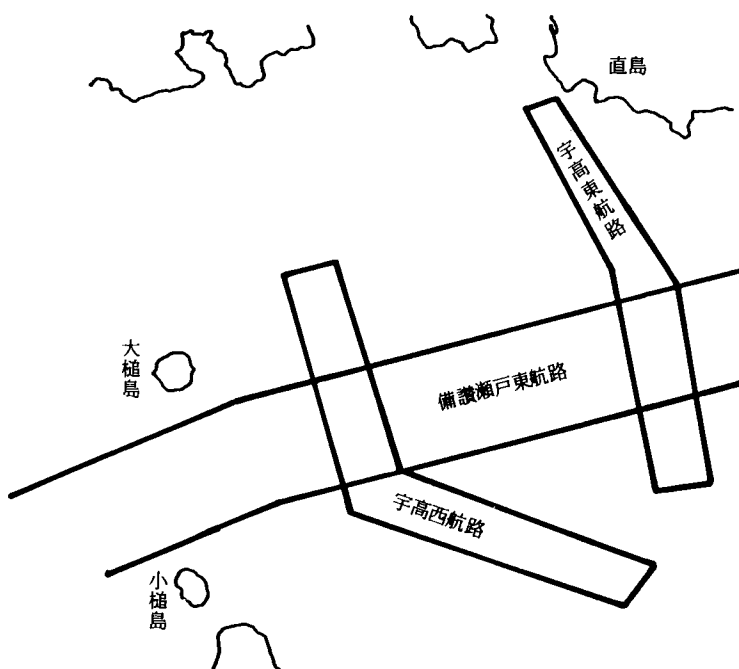
の2点を考慮した。

表3-4 備讃瀬戸における航路諸元

		$L_c$ (km)	$W$ (m)	$Q$ (ship/hr)	$\lambda$	$\mu_\omega$	$\sigma_\omega$
備東 讃瀬 戸部	東 航 路	37.0	1400	23.2	0.498	1.91	0.575
	宇高東航路	5.0	700	7.3	0.987	1.44	0.504
	宇高西航路	6.0	700	7.7	0.987	1.47	0.517
備西 讃瀬 戸部	北 航 路	22.0	700	13.3	0.013	1.71	0.463
	水 島 航 路	14.0	700	5.2	0.276	1.31	0.499
	南 航 路	23.0	700	15.3	0.986	1.77	0.476

本モデルによる推定値と実際の事故件数から求めた実績値、および先に紹介した藤井の方法による推定値を比較したものが表3-5である。実績値と藤井の方法による推定値は、東部、西部とも航路全体にわたるものである。これらと比較してみると、本モデルによる推定値は、東部では実績値に近いものとなっており、西部では実績値の1/2弱の推定値となっている。これは先に述べたように、東部では航路全体を対象として計算しているが、西部では対象とした航路（水島航路と北航路を通航する船舶のうち交差するものと、南航路を通航する船舶）の交通量が西部全体の交通量の約1/2であることに起因している。従って東部、西部とも推計値はほぼ妥当なものとなすことができる。

a) 備讃東部



b) 備讃西部

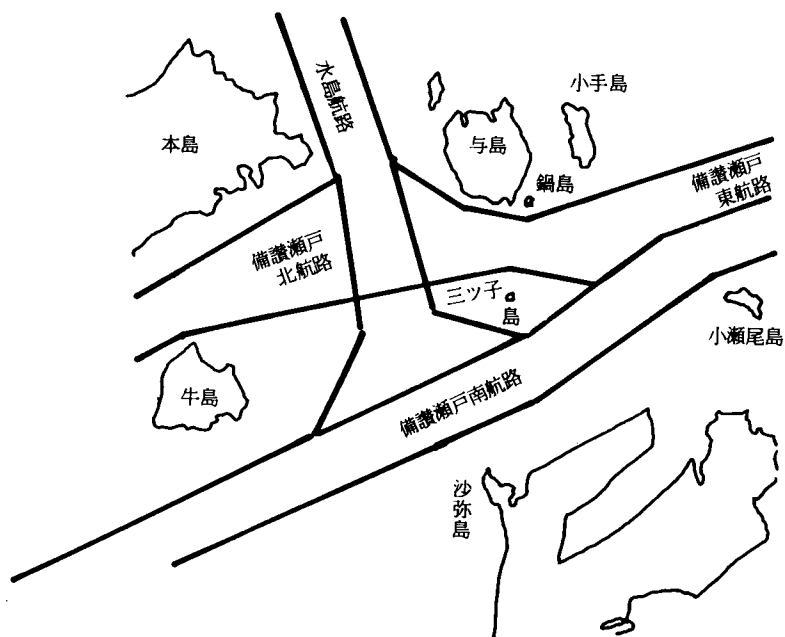


図3-19 備讃瀬戸航路図



なお、どちらも実績値を下まわる結果となっているのは、モデルの簡単化のために設けた仮定や考慮しなかった事項のうち、推計値を過小とするもの、すなわち、

- ①多重遭遇を考慮しなかったこと
- ②操業漁船が多い海域であるにもかかわらず、その存在を無視したこと
- ③夜間、狭視界の場合も視界の良好な時の諸数値を用いたこと

などによる影響が、推定値を過大とす

るもの、例えば、避航動作を変針のみに限定したことなど、による影響よりも大きいことによってもたらされたものと考えられる。ただし、実績値として用いた数値が高々5年間の平均値であるため、実績値の精度そのものにも問題は残っている。表3-6は東部海域の各航路ごとに更に細かく検討した結果である。実績値が個々の航路ごとに採られていないため比較することはできないが、交差部の衝突確率がそれ以外の区間より大きくなっている傾向が読み取れる。

### 3-7-3 航路横断橋への船舶衝突確率推定モデルに対する検討

航路幅1000m、船型構成分布のパラメータ $\mu_w$ 、 $\sigma_w$ がそれぞれ1.40、0.15である航路にスパン長1200m、橋脚直径25mの横断橋が架設されている場合を想定し、避航時の変針角は30°とした。この結果、1隻当りの基本衝突確率として、交通量が毎時40隻の時 $5.7 \times 10^{-7}$ 、毎時30隻の時 $2.2 \times 10^{-7}$ を得た。橋脚と船舶の衝突事故件数を交通量と関連づけて整理した統計は、筆者の知る限りではとられていないため、我が国主要狭水道における1トリップあたりの平均的な乗り揚げ確率の実績値 $1.5 \times 10^{-5}$ と比較すると、上記計算値は乗り上げ確率実績値の約1/25～1/70に相当する。この数値はかなり小さいようにも感じられるが、狭水道を航行することがさほど非日常的ではないのに対し、横断橋下の航行はかなり特殊な状況であるため、相当の注意を払って航行しているであろうことを考えると、一概に小さいともいえない。また、この値を年間期待事故件数に換算すると、それぞれ0.20件、0.06件となり、5年から18年に1度事故が発生するという常識からさほど遠くない数字が得られる。以上のことから、推定プロセスの各段階でかなりの簡単化がなされているモデルではあるが、一応の妥当性を有するということができよう。

表3-5 推計値と実績値との比較

水道名	本モデルによる推定値	実績値	藤井の方法による推定値
備讃東部	$0.797 \times 10^{-4}$	$0.399 \times 10^{-4}$	$1.216 \times 10^{-4}$
備讃西部	$0.323 \times 10^{-4}$	$0.852 \times 10^{-4}$	$1.172 \times 10^{-4}$

表3-6 備讃東部航路別衝突確率

	東航路	宇高東航路	宇高西航路
東航路	$0.238 \times 10^{-4}$	$0.600 \times 10^{-4}$	$0.676 \times 10^{-4}$
宇高東航路	$0.600 \times 10^{-4}$	$0.031 \times 10^{-4}$	
宇高西航路	$0.676 \times 10^{-4}$		$0.040 \times 10^{-4}$

#### 3-7-4 提案したモデルに関する若干の議論

以下では本推定モデルの各プロセスに存在する問題点を列挙し、これらに対する議論を行う。

その1は、本モデルでは避航の対象となる船舶の近傍を航行する他船の影響および避航動態に与える航路側端の影響が考慮されていないことである。この理由は、本モデルが1船対1船の避航挙動をもとに個々の出会いが相互に影響を及ぼし合うことがないとの仮定を導入して構築されたものであることによる。実際には図3-7に例示した如く、この仮定が成り立たない状況（多重遭遇）が生じることもある。操船者は自船の周囲のすべての船舶および航路側端に注意を払って操船しているため、実際の避航にあたっては、周辺を航行する全船舶の位置と相対運動を認識した後、例えば船舶密度の低い側へ避航したり、場合によっては減速して追い越しを中止することもあり得る。また、複数の相手船を船群と考えてこの船群に対する避航といったものを考える場合もあると思われる。このような挙動が衝突確率に及ぼす影響を考慮に入れ、航路内での船群の発生や多重遭遇など、混雑流内でしばしば見られる現象を取り扱うためには、2体問題のみならず多体問題を記述し得るモデルへと拡張することが必要となる。

その2は、用いた関係式についてである。例えば、避航開始距離分布や方位角分布が航路・交通諸特性と関連づけられていないといったように、本モデルで用いた航行船舶の動態に関する諸関係式は、種々の状況の下での、かつ十分豊富なサンプル数を有するデータをもとにして導かれたとはいいい難いものがある。とりわけ、航行挙動に関しては、船舶諸特性のばらつきが大きくかつ2次元的に運動しているため、検討すべき要因の数が道路交通に比して遥かに多いこと、反射的といっているほど迅速な運動動作が要求される自動車交通に比べ航行挙動に対する操船者のHuman Factorの影響は支配的であり、それが操船環境に左右され易いことなどを考え合わせると、必要かつ十分な要因によって説明される関係式の導出は困難であると思われるが、さらなる観測データの蓄積と精度の向上が望まれる。

その3は、モデル化の際に混入する誤差である。本モデルでは、転舵時の航跡を直線で近似したこと、他船との接近時の吸引力の効果を無視したことなど、記述を簡略にするための船体運動の単純化に伴う誤差が混入している。しかしながら、この誤差はモデルの使用目的—例えば航路相互の大略的な衝突確率の比較を行う場合や、個々の設計代替案の安全面の評価など—に照らして十分な精度であると考ええる。

その4は、分布形のあてはめに関する問題である。すなわち、実際の現象は有限領域でしか生じないにもかかわらず、無限領域で定義される分布形を当てはめていることである。

以上に述べたようなモデルに含まれている諸問題は、今後の検討課題として残されている。

なお、最後に、モデルを検証する際の一般的な問題として、実績値の精度の問題が議論されねばならない。衝突確率の実績値は、各航路における衝突隻数と通航総隻数の比であるが、前者の記録として「海難統計」、「海難速報」、「要救助海難統計」のどれをとるかににより衝突隻数は異なるものとなる。また、交通量調査は、主要狭水道についてはほぼ毎年定期的実施されているが、おおむね3日間調査で

あり、年平均交通量がどの程度正確に推定されているかも問題となる。さらに、衝突確率が年度によってばらつきがあるにもかかわらず、現在のところ長期にわたる記録が完備しているとはいえない。これらの点を考え合わせると、3-7で用いた衝突確率の実績値も幾分幅をもたせて考えるべきである。したがって、モデルの妥当性もこのことを念頭において論じられるべきである。

### 3-8 結 語

航路計画において航路の評価を行う際、交通事故的・海難に対する航行安全性は航路の混雑度を表わすひとつの指標とすることができる。ある特性を有する航路で、交通量が増大するほど安全性は低下し、逆に安全性を一定の水準以下に保つためには交通量に上限を設ける必要がある。すなわち、航路の交通容量は安全性の面からも規定される。

これまでに提案されてきた航路計画の評価指標としては、待ち時間<sup>21)</sup>や避航確率<sup>22)</sup>、安全係数<sup>23)</sup>などが用いられている。これらの指標に加え、本モデルで提案した船舶衝突事故確率や期待衝突事故件数といった安全性を示す指標も同時に航路の評価に用いることができる。今後、これらの指標間の関係を明らかにし、総合的に航路計画に用いられるようにする必要がある。

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) 横切りのない一様な航路を対象とする避航動態を考慮した運動学的な船舶衝突確率推定モデルを構築し、航路特性・交通特性と衝突確率とを関連づけた。
- (2) 実際の航路にはその数の多少は別として横断船舶が航行しており、上記モデルの適用には限界があるため、横切りをも考慮に入れられるよう拡張を図り、航路交差点における事故率推定モデルを提案した。そして、このモデルを備讃瀬戸の東部及び西部海域に適用し、モデルの妥当性を明らかにするとともに、結果に関する考察を加えた。
- (3) 拡張されたモデルは、同航、反航と横切りで避航、衝突を支配する要因が異なるため、挙動記述の簡略化などの取り扱いで横切りを考慮しないモデルと異なるところがあるが、基本的には互いに整合性のあるモデルとなっている。したがって、両モデルとも入力となる諸特性も共通であり、衝突することなく対象航路区間を通過し終える確率、 $P_{safe}$ 、の段階で、両者の結果は重ね合わせが可能である。
- (4) 簡略化の取り扱い、とりわけ船舶形状を表現する際に船舶長と船幅の双方を考慮することにより、横切りのない場合のモデルは、横切りを考慮したモデルの特殊な場合 ( $\phi = n\pi$ ) に帰着する。
- (5) 本邦主要航路における過去の衝突事故率実績値と本章で提案したモデルによる同一条件下での推定値を比較し、よい一致をみた。
- (6) 従来提案されているモデルとの比較検討を行い、航路の安全性向上施策の探索と代替案評価を行う

ための道具として、本モデルがより適切であることを示した。

- (7) さらに、航路・橋梁計画に資するための基礎として、船舶の航行挙動に着目した横断橋橋脚への船舶衝突確率推定モデルを提案し、設計諸変数や航路特性が衝突確率に及ぼす影響を定量化した。これより、航路側端と橋脚との間の緩衝帯の幅員が衝突確率に関してかなり支配的であること等、種々の知見が得られた。
- (8) 本章で提案した本モデルあるいは船舶交通流の挙動解析モデル一般が有するいくつかの問題点に関して議論を行い、今後のモデル改良の方向を明らかにした。

### 参考文献

- 1) K. Kuroda, H. Kita and S. Kono : Mathematical Model of Ship Collision Probability, Mem. of the Fac. of Eng., Kyoto Univ., Vol. XLIV, Part1, pp.135 ~ 157, 1982
- 2) 黒田・喜多・高橋：水路交差部における船舶衝突事故率の推定，第5回土木計画学研究発表会講演集，pp.602 ~ 608, 1983
- 3) K. Kuroda and H. Kita : Probabilistic Model of Ship Collision with Bridge Piers, Preliminary Report of IABSE Colloquium "Ship Collision with Bridge Piers and Offshore Structures", Copenhagen, IABSE Reports, Volume-Band 42, 1983
- 4) 黒田勝彦・喜多秀行：船舶衝突確率の推定モデル，土木学会論文報告集，No 339, pp.187 ~ 194, 1983
- 5) 黒田勝彦・喜多秀行：航路横断橋に対する船舶衝突確率の推定モデル，土木計画学研究・論文集 No 1, pp.59 ~ 66, 1984
- 6) 福島 弘：海難防止論，成山堂，p.35, 1972
- 7) 同上 6)，p.59
- 8) 杉崎昭生ほか：航路設計のための海上交通容量Ⅰ～Ⅵ，日本航海学会論文集，No 50, pp.39 ~ 45, 1973, ほか
- 9) 木俣 昇・石崎肇士：シミュレーションによる航路計画の研究，土木学会論文報告集，No 194, pp.113 ~ 126, 1971
- 10) 原 潔：船の衝突確率を任意の水域で推定する方法について，日本航海学会誌，No 46, pp.191 ~ 200, 1971
- 11) 原 潔：避航システムモデルによる衝突確率の考察，日本航海学会論文集，No 50, pp.29 ~ 38, 1973

- 12) R. G. Curtis. : An Analysis of the Dangers of Ships Overtaking, Mathematical Aspects of Marine Traffic, Academic Press, pp.175 ~ 191, 1979
- 13) 藤井弥平ほか：海上交通工学，海文堂， pp.80 ~ 83, 1981
- 14) G. R. G. Lewisson. : The Modelling of Marine Traffic Flow and Potential Encounters, Mathematical Aspects of Marine Traffic, Academic press, pp.129 ~ 159, 1979
- 15) M. Hondel and J. H. Kraay : Review of Traffic Conflicts Technique Studies, Research Report of Institute for Road Safety Research SWOV, The Netherland, R-79-9, 1979
- 16) E. Asmssen : International Calibration Study of Traffic Conflicts Technique, Springer-Verlag, 1984
- 17) 井上欣三：直線航路における航跡分布のモデル化と航路分離に関する一考察，日本航海学会論文集， No 58, pp.103 ~ 115, 1977
- 18) 藤井・巻島・原：海上交通工学，海文堂， p.143, 1981
- 19) 日本海難防止協会：海上の交通安全に関する調査研究完了報告書， p.37, 1970
- 20) 藤井弥平：船の直径と衝突発生率，日本航海学会誌， No 42, pp.1 ~ 8, 1969
- 21) 奥山育英ほか：輸送ネットワークの評価シミュレーションの拡張，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第4部， pp.167 ~ 168, 1977
- 22) 運輸省第三港湾建設局：大阪湾船舶避航確率調査報告書， 1981
- 23) E. Goodwin and R. B. Richardson : Strategies for Marine Traffic, J. of Navigation, Vol. 33, No 1, pp.40 ~ 48, 1980

## 第4章 衝突危険度に着目した避航領域の同定\*

### 4-1 概 説

航路などを航行しているある船舶に着目し、その船舶に対する他船あるいはブイ等の障害物の相対航跡を描くと、着目船を取り巻くように相対航跡が存在しない領域が見られる（図4-1参照）。この領域が「避航領域」と呼ばれるもので、その船舶が有する、他船をそれ以上内側へ接近させない領域、あるいは自船がそれ以上他船に近づかない領域と見なすことができる。

これは、他船との衝突に対する安全性を確保するために、両船の航行状態に応じたある一定の距離を隔てていることが要請されるため生じるものと考えられる。このような領域は「車間距離」として道路交通にも見られるが、車間距離が進行方向のみの一次元的概念であるのに対し、避航領域は側方の広がりを持つ二次元的概念である。

さて、第2章で述べたように海上交通では安全性の確保が他の要素に比べてなによりも卓越しているため、操船者は所定の安全性をまず確保し、これを維持しながらなるべく迅速、快適かつ経済的に航行しようとしていると見なしてよい。上述の如く、安全性は他の船舶が何らかの理由で接近してきてもこれを十分かわすことができるような適切な距離を他船との間に保つことにより確保され、これが本章で

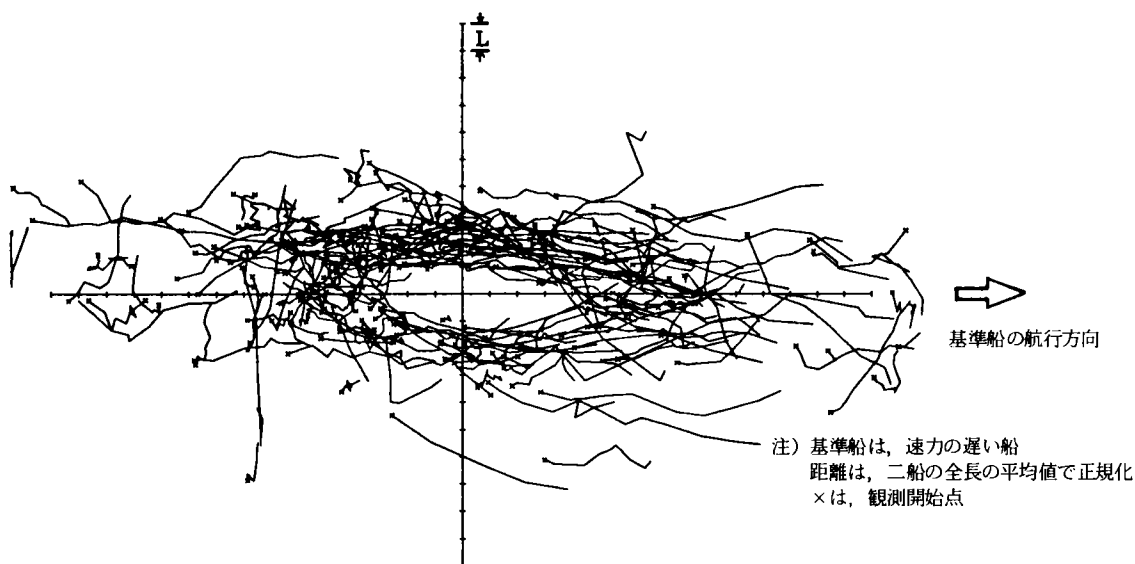


図4-1 反航船の相対位置頻度分布図（松井ほか<sup>4)</sup>による）

\*本章の一部は文献1)～3)として発表している。

論じようとする避航領域を形づくる。したがって、操船者が避航領域を確保しつつ迅速性、経済性等をできる限り高めるように操船するという仮説を立てることにより、一次元交通流と比べて解析がより困難である二次元交通流の解析あるいはモデル化が可能となるのではないかと、著者は考えている。

そこで、本章では、海上交通流解析の最も基礎的な概念ともなる避航領域に関して検討する。

これまで、避航領域は主として航行実態観測結果を統計的に整理することにより求められてきたが、その境界領域の設定基準に関してさまざまな提唱がなされており、未だ統一されるに至っていないのが現状である。避航領域を解析するに当たっては、その目的に応じた適切な記述の方法を明らかにしておくことが必須となるため、本研究では、まず、次節で避航領域の実際の姿に立ち戻って、それを記述する形式が具備すべき要件を列挙し考察を加える。その際、避航船舶のみによって被避航船の周囲に形成される領域を「避航領域」、避航の有無を問わず着目船とその近傍を航過する船舶との船間距離を「航過距離」と名づける。次いで、避航領域を解析する第1段階として、同航船に対する側方避航領域を算定するモデルを提案する。第3節では操船者の行動決定の基礎となる衝突危険度について説明し、先行船が変針ならびに逆転制動により減速する場合の追い越し船の衝突危険度を航行位置と対応づけて求める方法を述べる。そして、第4節で衝突危険度の空間的分布を念頭において操船者の避航コース選択構造をモデル化することにより、ある一定の状況下における避航領域を導出する。第5節ではモデルの妥当性が検討されるが、その際、観測データから避航船に関するもののみを抽出することの困難性から、両者を含む概念である航過距離分布と避航領域とを対応づけ、その結果を用いて航過距離分布の計算値を観測値と比較することにより、提案する避航領域モデルの妥当性を検証する方法を提案し、結果を示す。

## 4-2 避航領域の記述形式に関する考察

### 4-2-1 避航領域の記述形式が具備すべき要件

航路計画策定のための航行挙動解析の基礎とすべく避航領域の解析を行うという観点から、避航領域の記述形式は以下の要件を満たしていることが要請される。

- ① 航行環境と交通流の全体的挙動の関係を明らかにする際、船舶の交通流は他の条件が一定であっても個々の船型や船舶特性によって大きく影響される。そのため、各船の航行挙動を平均船型のそれで代表させるといった方法では、航行環境と交通流の全体的挙動の正確な関係を求めることができない。したがって、航行挙動の重要な局面である避航や追従は、個々の船舶に注目して、これを明示的に取り扱う必要がある。この意味において、避航領域モデルは非集計的でなければならない。
- ② 避航領域の設定法は、交通流の全体的挙動の推定に直接影響するファクターであり、これらが正確に記述されていないと結果が大きくゆがめられる。避航領域は避航挙動の結果として生成される領域であるため、非避航船、すなわち自由航行している船舶を分離せずに解析した場合、どこまで

が避航挙動を表現するものかが定かではなくなる。この意味で、厳密に避航船のみを対象として算定される必要がある。

- ③ 避航挙動は避航船と被避航船を含めた周辺の航行環境によって左右されるもので、これを取り入れた記述とする必要がある。
- ④ 通常、避航は③で述べた状況下で、避航船が環境を認識し、次いで自船及び周辺の船舶挙動を予測し、最終的に避航コース及び避航時機を決定して実施される。このような避航船の判断を何らかの形で取り入れておく必要がある。
- ⑤ 避航は④で述べた結果としての挙動であるので、被避航船の挙動の不確実性、自船の運動に含まれる不確実性、さらには、避航船の操船者の判断に含まれる不確実性が避航挙動を表現するモデルに明示的に取り入れられる必要がある。この結果として避航領域は、本来的にばらつきを持つものとして表現される。

#### 4-2-2 船舶を取りまく領域に関する従来の研究

航行挙動の結果として船舶の周囲に形成される領域を取り扱った研究はこれまでも数多く見られるが、輻輳の程度が顕著な航路の航路計画の基礎情報とするといった本研究の目的を満足するものは、藤井ほか<sup>5)</sup>による“後方閉塞領域”および藤井<sup>6)</sup>による“避航領域”以外には見当たらないのが現状である。ただし、前者は追従航行時の可能交通量を算定するために提案されたものであるため、追越しが生じるような状況をも対象として検討することが可能なわけではない。また、後者は確定値としての取り扱いがなされ、分布形を記述するものではない。

また、観測結果を統計的に整理することにより領域を抽出した研究として、藤井ほか<sup>5)</sup>以外に、杉崎<sup>7)</sup>、Goodwin<sup>8)</sup>、早藤<sup>9)</sup>、奥山・早藤<sup>10)</sup>、松井ほか<sup>4)</sup>がある。詳しい内容の説明は藤井<sup>11)</sup>に譲るが、そのいくつかを以下に簡単に紹介する。

まず、藤井ほか<sup>5)</sup>に見られる船舶技術研究所のグループは、通常の航行条件で、追い越しにくいほど船の密度が高く、かつほぼ同程度の大きさの船がほぼ一定の速度で航行するという状況の下で、“閉塞領域”なる概念を導入した。その定義は、「先行船に対する後続船の相対位置の密度分布を求め、この密度極大の点を連ねる曲線と、先行船の船首を通り進行方向に直角な線に囲まれた領域」としている。(図4-2(a))。

一方、杉崎<sup>7)</sup>に見られる東京商船大学のグループは、「周囲の船を線でなく点でとらえることは、局部的にまとまった船群の存在や密度の加法性についての考察を必要とし、適切でない」と上記を批判し、“基本閉塞領域”なる概念を提案した。これは、「ある船のプロフィルの周囲にできる航跡の包絡線をもって閉塞領域とする」というものであった。(図4-2(b))。



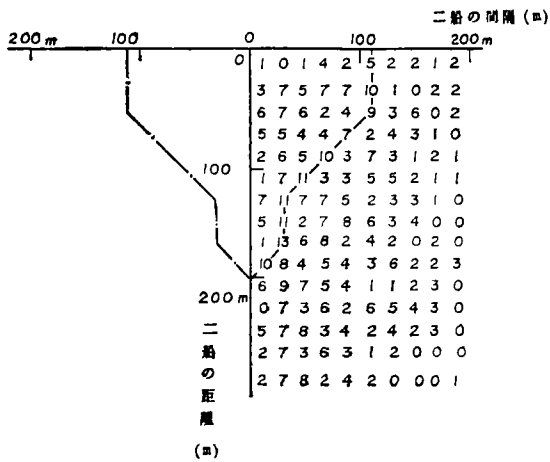


図 4-2 (a) 藤井ほか<sup>5)</sup>による閉塞領域

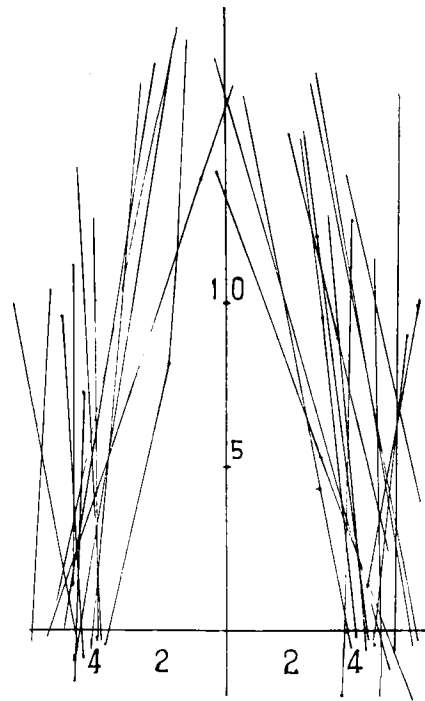


図 4-2 (b) 杉崎<sup>7)</sup>による基本閉塞領域

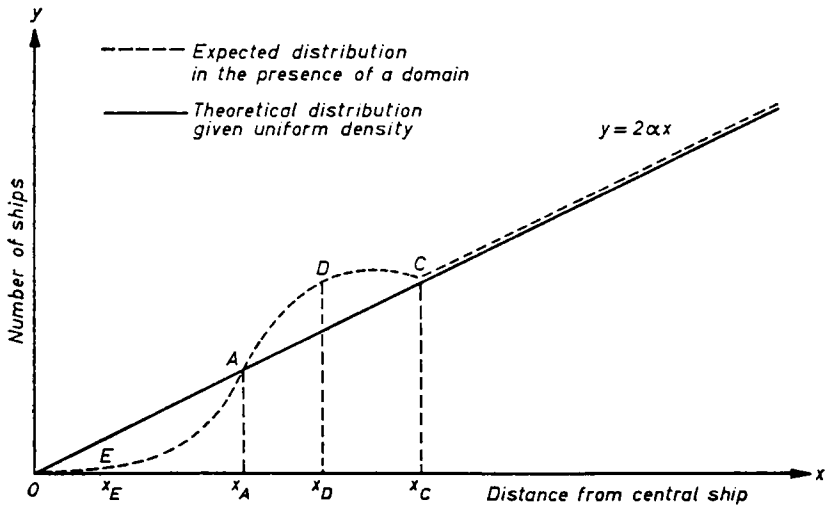


図 4-2 (c) Goodwin<sup>8)</sup>による Ship Domain

さらに、Goodwin<sup>8)</sup>は、「他船や固定物に束縛されないように保持したいと操船者が考える領域」として、“Ship Domain”なる概念を提案し、「その領域の内部の船舶密度が、その海域の平均密度と等しくなる領域」をその定量的な基準としている。(図4-2(c)におけるC点)。

また、運輸省<sup>12)</sup>は、領域の大きさを距離ではなく、2船の交差時間差の頻度分布の形で求めている。

しかしながら、これらの領域は、早藤<sup>9)</sup>を除き、非避航船を分離して求めたものではない。また、領域のばらつきは認識しているものの、運輸省<sup>12)</sup>を除いて、ばらつきそのものを記述するのではなく、領域の境界の設定基準を主たる議論の対象としている。本研究は、領域の設定基準を議論することが目的ではなく、この議論のために必要となる避航領域の分布形状を明らかにしようとするものであるため、これらの基準について論評することはせず、現象の記述とその評価とは分離して考えるべきであることのみを指適しておきたい。

一方、避航操船が可能な限界を船舶の操縦性能と関連づけて議論した鞠谷<sup>13)</sup>、原<sup>14)</sup>、杉崎・大津<sup>15)</sup>など、衝突回避限界あるいは避航限界と呼ばれる概念に関する研究が行われている(詳しくは原<sup>16)</sup>を参照されたい)。この記述は非集計的になされており、個々の状況に対してその領域を求めることができるが、「人間の情報の収集や状況判断、意志決定を行うことと、他船が操船者の想定どおりに操船してくれる保証がないので、操縦性能だけで決めた避航限界を実際に利用するには問題がある」との指摘<sup>16)</sup>からも明らかなように、そのまま交通流挙動の解析やモデル化に転用できるものではない。しかし、この指摘は、同時に上述の不確実性に対するいわば余裕領域とでも呼ぶべきものの検討を示唆しており、実際、渡辺<sup>17)</sup>、今村<sup>18)</sup>、今津<sup>19)</sup>などのアプローチは、分布形状こそ論じていないが、避航領域を解析するうえで有用な情報を与える。

以上、避航に関連する船舶領域を扱った2つのアプローチについて触れたが、先に述べた要件を兼ね備え、輻輳水域における航路計画の基礎としうる避航領域を統計的に求めるに当たっては、多くの異なった水域における極めて大量の観測データを必要とするほか、避航船と非避航船の判別の問題など相当な困難が予想される。そこで、結果として現れる避航領域だけに目を向けるのではなく、逆に、それが生成される構造を探ろうとする本研究のアプローチがクローズ・アップされてくる。

## 4-3 操船者の意思決定と避航領域

### 4-3-1 本研究における避航領域の考え方

前節で示したような要件を満足する避航領域の同定を可能とするため、本研究では、避航領域は避航時における操船者の意思決定による避航行動の結果の集積として被避航船の周囲に生成されるものと考ええる。すなわち、操船者の主観的な意思決定に基づく避航領域というものを考えてみる。

そのために、操船者の意思決定構造を明らかにして、操船者の避航行動のモデル化をはかる。そして、

その一連の避航行動に基づいて、避航領域を導く避航領域モデルを作成する。すなわち、避航領域を構成する避航時航行挙動の基礎を操船者の意思決定に求めることにより、操船者が本来有する認識・判断のばらつきを考慮できるモデルとする。また、避航時の航行条件をいくつかの説明変数として与えることにより、任意に設定された航行条件の下での避航領域を求めることが可能となるようにしておく。

同航船、反航船、横切り船のそれぞれに対して避航領域の大きさ、形状は大きく異なるが、本研究では、まず、直線状航路での追い越しに着目し、追い越し船が被追い越し船である先行船の周囲に形づくる避航領域を求めることとする。

なお、避航領域と似た概念に閉塞領域があり、これは、藤井ほか<sup>5)</sup>によれば「避航領域の特殊なケースであり、相対速度が0またはそれに近い場合のものである」と定義されている。本研究においても、閉塞領域を避航領域の特殊な場合と考え、航行条件として非常に交通密度が高い場合を想定することにより求められるものとする。すなわち、大多数の船舶が追い越しをあきらめて追従する状態を閉塞状態とし、その時の避航領域の大きさを閉塞領域とする。よって本研究において、特に閉塞領域のみを取り上げて定量化することはしない。

#### 4-3-2 操船者の意思決定に影響する要因と行動決定基準

追い越し船の操船者は、自らのとりたい進路上に、そのまま航行を続けると衝突またはそれに近い状態に陥る危険性のある先行船を発見した場合、変針してその先行船を追い越すか、あるいは減速して追従するか、といった意思決定をしなければならない。

ところで、操船者は考えうるいくつかの進路を代替案として暗黙のうちに設定し、この中からある評価基準に照らして最も適切な進路を選択しているものと推察される。そこで、以下では、操船者の意思決定モデルを作成する最初の段階として、代替案として比較・検討される進路を設定する際に考慮される要因と、その進路を選択するにあたっての評価基準について述べる。

代替案としていくつかの進路を設定するにあたり、操船者が考慮すると考えられる要因を分類・整理したものが図4-3である。ここでは、要因を航路特性、船舶特性、交通特性、自然条件に分類している。

避航を行う際、操船者は実際には避航の対象となる船舶やその近傍を航行している船舶の船型、自船に対する相対位置と相対速度、自船の操船性能、船舶への外力としての自然条件などを検討材料として進路設定を行っているものと推察される。しかしながら、例えば、近傍第3船との相対位置は、船型構成分布や航行位置分布、交通密度、船間距離分布などから確率論的に規定され、これらはさらに、航路幅や交通量、航路側端条件などによって規定されているのである。上に列挙した実際の検討材料が避航の際の意思決定プロセスのどの局面で用いられるかの考察、ならびに図4-2の諸特性との定量的な関係づけは後程行う。

一方、長尾<sup>20)</sup>による「交通の6要素」にならえば、操船者の評価尺度を構成する要素として、航行の

「安全性」、「経済性」、「迅速性」、「快適性」、「確実性」、「利便性」という6要素を挙げることができる。このうち、船舶の避航、すなわち他船との衝突を回避する局面では安全性の確保が最も卓越した要素となることは言うまでもないが、安全性の確保のみで全て決定が下されるわけではない。十分な安全性を確保するための避航による航行距離の増加や追従航行による速度の低下は燃料費の増加をもたらすため経済性を低下させ、同時に迅速性をも低下させる。さらに、頻繁な避航操船が快適性を低下させるなど、多くの場合、安全性とそれ以外の要素とはトレード・オフ関係を構成している。操船者はこれらを意識的ないしは無意識のうちに総合的に評価し、最も高い効用を与える代替案を選択していると想像される。

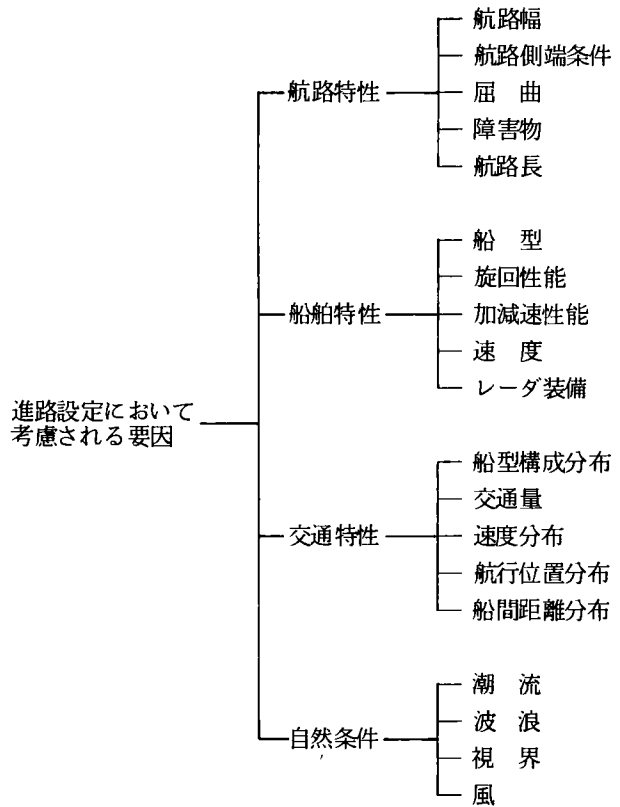


図4-3 進路設定に影響を及ぼす諸要因

## 4-4 同航時側方避航領域のモデル化

### 4-4-1 モデル化の方針と操船者が抱く衝突危険度

上述のような操船者の意思決定行動を記述し、定量的に解析を進めるには、何よりもまず、操船者の感じる衝突危険度がいったいどのようなものであり、何によって規定されているかを明らかにしなければならない。

追い越し船は先行船の将来の進路に関して完全な情報を持っているわけではなく、したがって、追い越し船の操船者にとって、先行船の今後の挙動は不確実性に包まれていると考えられる。先行船の今後の挙動は大別して、

- ① 現在の進路・速力を保ったまま航行し続ける
- ② 変針を行う
- ③ 減速を行う

の3つが挙げられ、変針・減速については、さらに、その程度により区分される。操船者にとって、先

行船が突然変針・減速することにより自船に接近し衝突すること、あるいは、それを避けようとして他船と衝突してしまうことが、輻輳水域における避航操船の際に予想される主たる危険であるため、本研究では、これらの事象が生起する可能性の確率表現をもって、操船者が抱く衝突危険度とする。

さて、上述の衝突危険度は、自船の進路上の回避しきれない位置に先行船が進出してくる確率であり、この確率は、自船が予定の進路からはずれてある位置へと進む確率と、その位置からは衝突を回避しきれない位置に先行船が変針または減速により進出する確率から与えられる。前者は、図3-2に示した認識・予測の不確実性に起因するものである。後者の変針・減速については、次のように考えることにする。まず、先行船が変針ないしは減速するのは、一様な直線状航路内ではほぼ避航の必要が生じた時に限られると考えられるが、この時、先行船の操船者が、接近してくる後続船である自船を全く認識していないか仮に認識していても後続船に対する安全性に何ら配慮を与えない場合は、もっぱら変針避航を行い、逆に、後続船を認識し安全性を十分配慮する場合には、変針することなく減速により避航する。実際は変針と減速のどちらか一方ということではなく、適宜両者を使い分けて航行していると考えられるが、変針のみによる避航と減速のみによる避航の両方を考えておけば両極端を検討することに相当する。本研究では簡単のため、「操船者は全ての先行船が変針避航により自船と衝突する危険を有するものとする」との仮定をおく。一般に、変針避航は減速避航に比べて大きな領域を使用するため、この仮定は操船者にとっては安全側、避航領域の大きさの観点からはやや過大に見積もる方向に働く。

次に、先行船がどのような変針をどのような確率で行うかにより操船行動は影響されるが、先行船の変針挙動の予測が後続船の操船者および直面している状況ごとに全く異なると考えることは解析をいたずらに複雑なものとするため、「操船者は、過去の経験に基づき、先行船の変針挙動（具体的には旋回半径と変針角）の生起に関する一定の主観確率を持っている」との仮定を置く。これもモデル構築の際の簡単化の一つであるが、この仮定を緩めて、経験や技術の差により操船者ごとに異なる主観確率を持つ場合への拡張は容易である。また、主観確率一定とした本仮定は、操船者が先行船のさらに前方の状況によってこの主観確率を修正し、例えば、後続船の操船者が、「先行船の前方を低速船が航行しているから先行船は近い将来避航を行うために変針するに違いないと考え、早い時期に変針して二重追越しをかけたり、あらかじめ減速したりする」ことのないことをも意味している。操船者がどの程度遠方までの情報を判断材料として用いるかは特定が困難であり、このことも含めて、本研究では、さらに、「操船者は自船の前後左右直近の船舶のみを念頭に置き、それより遠方の情報を何ら得ることはない」との仮定を設ける。

なお、操船者がとる避航方法としては、先行船の直近を追い越す変針避航と減速による追従避航のみを考え、周辺を航行している同航他船のさらに外側を迂回することは考えないものとする。

したがって、これらの要因からなる操船者の効用関数を知ることができれば、効用最大化行動として

避航行動をモデル化することが可能であるが、現段階では極めて困難であると言わざるを得ない。そこで、本研究では、操船者の効用を、輻輳水域における避航という局面で最も卓越する要因と考えられる安全性の代替指標である衝突危険度の上で定義された関数と考え、「追い越し船の操船者は不効用が最小となるコースを選定して避航する」と仮定する。その際、衝突危険度には、操船者がこれ以上大きな危険は受け入れられないため他の何を犠牲にしても安全性を確保したいと考えるような上限を考えることができ、これを“最大許容衝突危険度、 $R_{max}$ ”と呼ぶことにする。逆に安全性を高めることがそれ以上の経済性や迅速性の低下をもたらし、かえって不効用が増大するためこれ以上安全性を高める必要がないと考える下限もまた考えられ、“最小許容衝突危険度、 $R_{min}$ ”と呼ぶ。

図4-4を用いて、この2種類の許容衝突危険度を概念的に説明しよう。例えば、先行船からなるべく遠ざかって避航させる方向に働く要因として衝突危険度を、なるべく先行船の近くを通過させようとする方向に働く要因として経済性をとることを考える。図4-4(a)は追い越す位置が先行船に近づくほど衝突危険度に関する不効用が大きくなり、逆に先行船から遠ざかるほど経済性に関する不効用が増大する様子を示している。総合的な不効用はこの両者の和で与えられ、操船者は総不効用が最小と

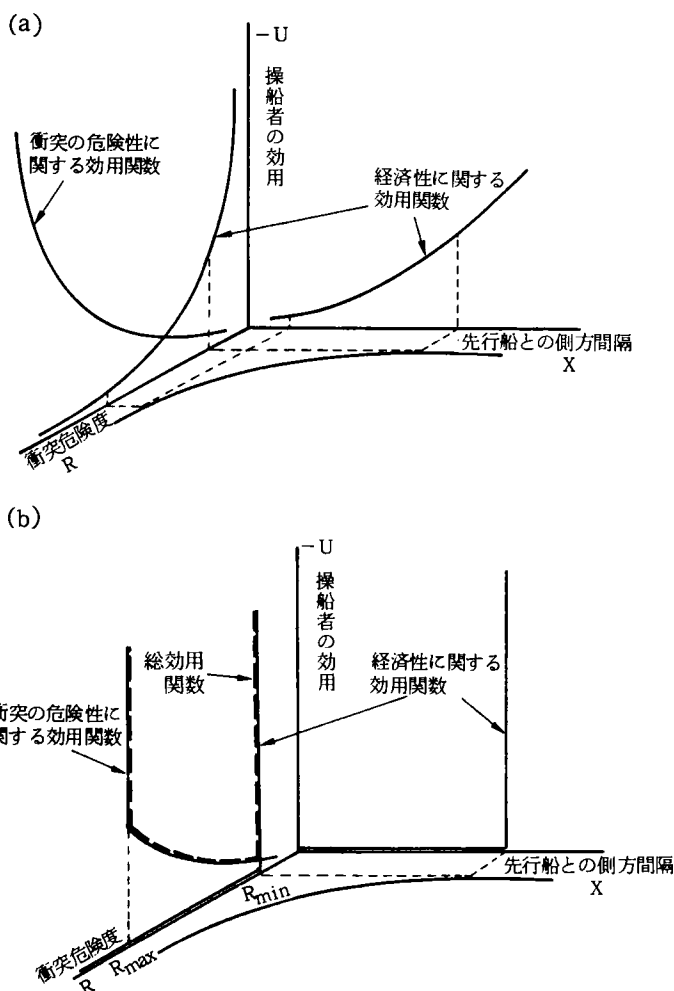


図4-4 側方間隔と操船者の効用の関係を示す概念図

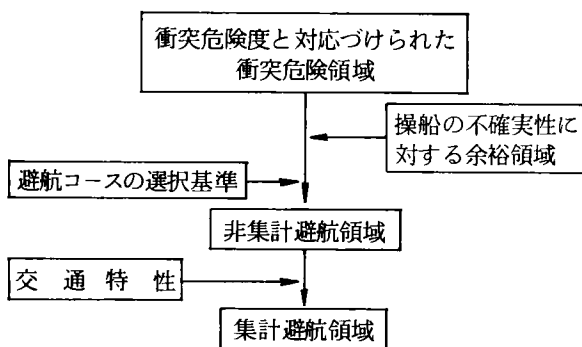


図4-5 避航領域のモデル化のプロセス

なる衝突危険度に対応する位置を目指して追い越すものとする。しかるに、経済性に関する効用関数を同定することが困難であること、および、先に示した衝突危険度の許容範囲に一定の限界が存在するとの考え方から、双方の効用関数を図4-4(b)に示すような関数形に置き換えて考えると、総効用関数は図中に破線で示される形状となる。先行船の周囲に他の船舶が存在しない場合には、後続船の操船者は総不効用の最も小さい位置、すなわち、 $R_{min}$ に対応する側方間隔を選択する。一方、周辺に同航する第3船が存在する場合にはこの船に対しても同様の効用関数を描く事になり、結局、後続船の操船者は双方の不効用の和が最小となる衝突危険度に対応する側方間隔を選択して追い越すと考える。

許容衝突危険度は、経済性・迅速性などが重視され、あるいは操船者が効用理論で言うところのリスク志向型 (risk prone) であればあるほどより大きな値となり、逆に安全性が重視され、あるいは操船者がリスク回避型 (risk aversion) であれば小さくなると推定される。このような許容衝突危険度をいかに設定するかについては議論の残るところではあるが、この問題に関する厳密な検討は今後の研究に待つこととし、本研究では上・下限を有する評価尺度上で最も衝突危険度を小さくすること (衝突危険度最小化) を操船者の行動決定基準として採用して、解析を進めることとする。

#### 4-4-2 衝突危険度の算定と衝突危険領域

以下では、衝突危険度を先行船と自船との位置関係から算定する方法について述べる。

図4-6に示すように、ある任意の時刻に、先行船がその進路を回頭によって変更し始めたとする。この回頭開始時の先行船の位置を座標原点とし、回頭後、時間  $t$  の後の先行船の位置を  $(x_1, y_1)$  とする。先行船“1”は速度  $V_1$ 、垂線間長  $L_1$ 、自船“2”は速度  $V_2$ 、垂線間長  $L_2$  とし、 $V_2 > V_1$ 、すなわち、自船が先行船を追い越す場合を考える。さて、船舶の変針時の航跡は近似的に円弧で表わされるものとし、計算の便宜上、 $90^\circ$  回頭した後はその方向に直進するものと仮定する。いま、先行船の回転半径を  $r$  とすると、回頭開始  $t$  時間後の先行船の位置  $(x_1, y_1)$  は、次式で与えられる。

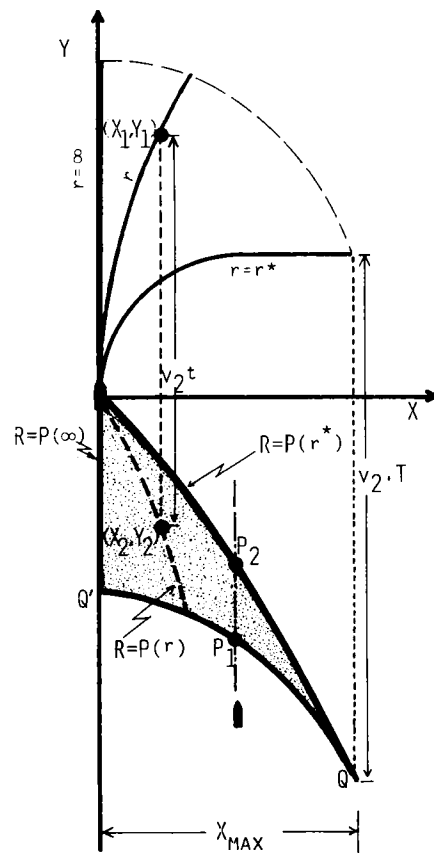


図4-6 衝突危険度と衝突危険領域

$$\begin{cases} x_1(t, r) = r \{1 - \cos(\frac{V_1 \cdot t}{r})\} \\ y_1(t, r) = r \cdot \sin(\frac{V_1 \cdot t}{r}) \end{cases} \quad \text{for } \frac{V_1 \cdot t}{r} \leq \frac{\pi}{2} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\begin{cases} x_1(t, r) = r + V_1 (t - \frac{\pi}{2} \frac{r}{V_1}) \\ y_1(t, r) = r \end{cases} \quad \text{for } \frac{V_1 \cdot t}{r} > \frac{\pi}{2}$$

一方、自船は先行船の回頭と同時に避航のための回頭を開始できるわけではなく、ある一定時間 $T$ の間直進してしまう。この時間 $T$ は、先行船が回頭し始めてから操船者がそれに気づくまでの認識遅れ時間 $\tau$ と、転舵発令後実際に回頭を始めるまでの時間遅れ $T_c$ の和であり、さらに、 $T_c$ は船舶の追従性指数 $T_{c1}$ と操舵時間 $T_{c2}$ の和と考えられる。衝突はこのような避航の遅れに起因すると考えられるわけで、渡辺<sup>17)</sup>が示しているように、先行船が進路を変更して $t \leq T$ なる時刻に $(x_1(t), y_1(t))$ に進出してくる場合、先行船が回頭を始めた瞬間に、自船が、

$$\begin{cases} x_2 = x_1(t, r) \\ y_2 = y_1(t, r) - V_2 t \end{cases} \quad t \leq T \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

で示される位置 $(x_2, y_2)$ を航行しているならば、必ず衝突に至る。逆に、(4.2)式の位置 $(x_2, y_2)$ を航行する自船が時間 $t$ 後に先行船と衝突する可能性は、先行船の進路変更の可能性によって定まる。この可能性を回転半径が $r$ 以下になる確率 $P(r)$ で評価することになると、 $(x_2, y_2)$ を航行する自船の衝突危険度 $R$ は $R = P(r)$ で与えられる。(4.2)式は、任意の時間、 $0 \leq t \leq T$ に対して成立するので、 $R = P(r)$ であるような $(x_2, y_2)$ の軌跡は、図4-6の点線で示すように、 $t$ を $t=0$ から $t=T$ まで変化させることによって得られる。この軌跡を、リスク・レベルが $R = P(r)$ である等リスク線と名づけることにする。リスク・レベル $R = P(r)$ は $r$ の大きさに依存することから、現実には起こり得る $r$ の範囲を $r^* \leq r < \infty$ とすると、 $r = r^*$ 、 $r = \infty$ に対応する等リスク線が図4-6の破線で示すように得られる。

このように、種々の $r$ に対して等リスク線を描くと、図4-6の実線で囲まれた領域を得ることができる。この領域を衝突危険領域と名づける。この領域は、自船が先行船を追い越すためにその中に進入すると先行船が回頭の可能性を持つ限り衝突の可能性が必ず存在する領域で、その衝突の可能性は当該位置に対応する回転半径の生起する確率に等しい。したがって、この領域に進入しない限り衝突の危険性は0である。この領域は右端(図4-6の点Q)のX座標を $x_{max}$ とすると $x_{max}$ は $r = r^*$ に対応す



る等リスク線の右端の座標に相当するので、次式で与えることができる。

$$x_{max} = \begin{cases} r^* \{ 1 - \cos ( \frac{V_1 \cdot T}{r^*} ) \} & \text{for } \frac{V_1 \cdot T}{r^*} \leq \frac{\pi}{2} \\ r^* + V_1 ( T - \frac{\pi}{2} \frac{r^*}{V_1} ) & \text{for } \frac{V_1 \cdot T}{r^*} > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

よって、自船は  $x > x_{max}$  となる位置を進行する限り、先行船 “1” と衝突する危険はない。

さて、追い越そうとする自船にとって、最も関心があるのは、図4-6の衝突危険領域の下側の境界 ( $t=T$  に対応する包絡線) である。何故なら、領域に踏み込んで追い越そうとする場合に、通過する点のうち最も衝突危険度の高い点は、この境界線で決定されてしまうからである。例えば、図4-6において、 $P_1 - P_2$  なる進路を考えると、この進路で最も衝突危険度が大きいのは、境界線上の点  $P_1$  である。

境界線は  $x$  の一価関数であることから、追い越し船にとって最大の衝突危険度  $R^*$  は、境界線の  $X$  座標のみによって決められる。いま、この境界線上の任意の点の  $X$  座標を  $x_B$  とすると、

$$x_B = x_1 ( t = T, r ) \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

で、 $r$  の一価関数として求められる。

これより、

$$r = x_1^{-1} ( T, x_B ) \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

となるので  $R^*(x_B)$  は、

$$R^*(x_B) = \int_{r^*}^{x_1^{-1}(T, x_B)} p(r) dr \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ただし、 $p(r)$  は  $r$  の確率密度関数であり、舵角  $\delta$  の確率密度関数  $p(\delta)$  から、

$$\delta = \frac{L}{K'r} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

なる関係を介して与えられる。ここに、 $L$  は船舶長、 $K'$  は無次元化された施回性指数である。

ところで、2船が接近した場合、流体力の作用によって吸引現象が発生するため、それ以内に近づけば衝突が避けられないとみなされる、ある側方距離  $W_S$  を設定する必要がある。本研究では、西日本港湾運航技術研究会<sup>21)</sup> による Ship Clearance の算定に基づきこの距離  $W_S$  を、

$$W_S = 0.4 ( L_1 + L_2 ) \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

で求めることとする。この吸引が瞬間的に起こると考えると、 $x \leq W_S$  の範囲では必ず  $R=1.0$  とみなす

ことができるため、新たに、

$$x = x_B + W_S \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

とし、 $\hat{R}(x)$ を次式で定義する。

$$\begin{cases} \hat{R}(x) = 1.0 & \text{for } x < W_S \\ \hat{R}(x) = \int_{r^*}^{x_1^{-1}(r, x)} p(r) dr & \text{for } x \geq W_S \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

$\hat{R}(x)$ で規定される衝突危険領域を新たに修正衝突危険領域と呼ぶ。なお、実際には外力条件や操船時の認識・予測に係わる不確実性が存在するため、追い越し船が先行船の側方のある位置 $x$ を目指して航行したとしても実現する船位 $x$ は $\epsilon$ だけずれ、

$$x' = x + \epsilon \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

となると考えられる。そこで、ずれの確率密度関数を $f(\epsilon)$ とし、これを考慮すると、 $x$ を目指した場合の期待される衝突危険度 $\tilde{R}(x)$ は、次式で与えられることになる。

$$\tilde{R}(x) = \int_0^\infty \hat{R}(x + \epsilon) f(\epsilon) d\epsilon \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

修正衝突危険領域と衝突危険度の関係を示す概念図を図4-7に示す。

以上、先行船が追い越し船に与える衝突危険度が算定できた。一方、追い越し船が先行船を追い越した後、先行船とどの程度の間隔を保持しておけば先行船の前方へ進出することができるのであろうか。これを知るためには自船が減速することによる衝突危険度を算定しておく必要がある。

船舶が逆転制動をかける場合、進路が不安定となり衝突の危険を生ずる。そこで、制動をかけた自船が他船の前方に進出してしまう可能性を衝突危険度と考えれば、制動発令後

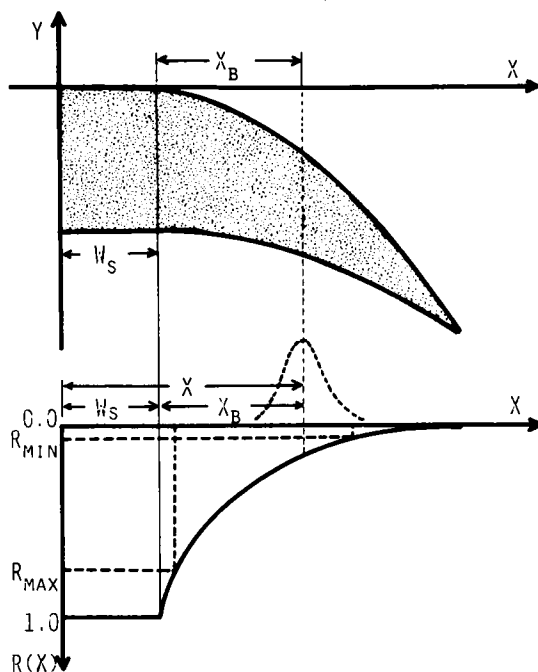


図4-7 修正衝突危険領域と衝突危険度

の航跡とその航跡が実現する確率を知ることにより、変針による衝突危険度と全く同様にして解析する。よって以下では、上述の航跡とその生起確率のみを明らかにし、その他の部分は上記で示した方法によるものとする。

神戸商船大学港湾運航技術研究会<sup>22)</sup>には、機関逆転制動時の速度は時間に対してほぼ直線的に減少し、その航跡は円弧に近い滑らかな曲線であることが示されている。渡辺<sup>17)</sup>は、これより「速さは一定の加速度 $\alpha$ で減じ、同時に進行方向は一定の角速度 $\psi$ で変化する」との仮定をおき、制動開始から時間 $t$ 後の船舶の位置 $(x_a, y_a)$ を、

$$\begin{cases} x_a = \frac{V}{\psi} (1 - \cos \psi t) + \frac{\alpha}{\psi^2} (\psi t \cos \psi t - \sin \psi t) \\ y_a = \frac{V}{\psi} \sin \psi t + \frac{\alpha}{\psi^2} (1 - \cos \psi t - \psi t \sin \psi t) \end{cases} \dots\dots\dots (4.13)$$

と表している。ここに、 $\psi$ は $0 \leq \psi \leq \psi_{max}$ の範囲の値をとるが、どの $\psi$ の値が出現するかは「まったく気まぐれ<sup>22)</sup>」な状態であるため、変針避航の際の回転半径とは異なりその生起確率は一定値をとるものと仮定する。よって、逆転制動をかけた後に角速度 $\psi$ なる航跡をとる確率 $p(\psi)$ は、

$$p(\psi) = \frac{1}{\psi_{max}} \dots (4.14)$$

で与えられる。

以上により、変針の場合における(4.1)式の代わりに(4.13)式を、(4.10)式の $p(r)$ の代わりに(4.14)式の $p(\psi)$ を用いることにより、減速による衝突危険度と衝突危険領域が同様の手順により算定可能となる。図4-8は、このようにして得られる衝突危険領域の形状を示すものである。

#### 4-4-3 避航コースの選択

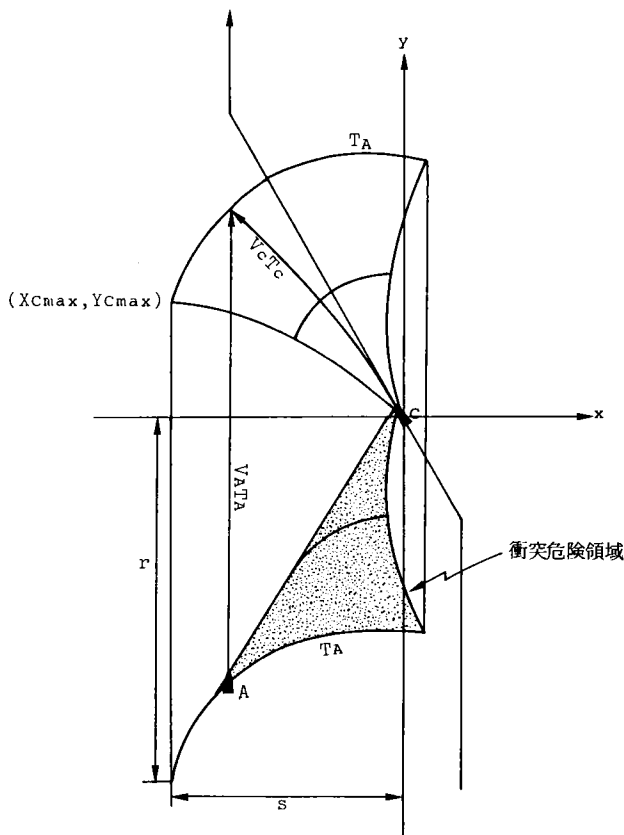


図4-8 自船の減速避航による衝突危険領域

#### (1) 避航コースの選択基準

4-4-2では、ある1隻の先行船に対する衝突危険度の算定法を示したが、輻輳水域で避航操船を行う際には、当面の避航対象となっている先行船以外に、周辺を航行する船舶（以下、第3船と呼ぶ）に対しても安全を確保することが要請される。そこで、先行船を避航する際に、それに対する衝突危険度を考慮しなければならない第3船が存在するか否かの別により、操船者は以下のように避航コースを選定するものとする。

考慮すべき第3船が存在しない場合、追い越し船の操船者は、まず自船の航行位置から4-4-2で示した $R=R_{min}$ に対応する側方間隔が確保できる位置まで変針避航を行う。この動作は衝突危険領域の下側境界線に達するまでに完了するものとし、しかる後、上述の側方間隔を保持するように先行船に並進して衝突危険領域を通過する。本領域を抜け出た後そのまま直進する場合は、抜け出た時点で先行船に対する避航が終わると考える。しかし、元の航行コースに戻るため、あるいは、さらに前方に船舶が航行しているために追い越した先行船の側へ変針しようとする場合は、自船が何らかの原因で減速する際に針路不安定となって今追い越した先行船に衝突する可能性がまだ残っているため、それに対する衝突危険度が $R_{min}$ を越えないコースをとりうる位置までさらに進んだ時点で避航を終えると考える。

一方、上述のように、先行船に対する避航の開始から終了までの間に、近傍を航行する第3船に対して $R_{min}$ 以上の衝突危険度が生じる場合には、両船に対する衝突危険度が等しくなるコースを選択するものとし、さらに、そのコース上での衝突危険度が $R_{max}$ を越える場合は、追い越しをあきらめて現在のコースのまま追従するものと考え

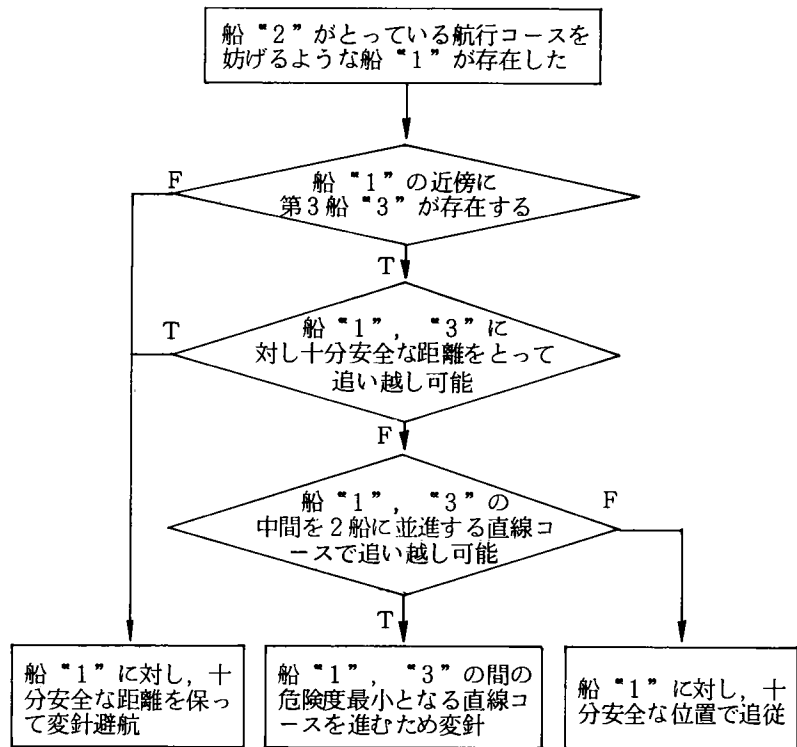


図4-9 避航コースの選択

る（図4-9参照）。

このようにして避航コースが選択されるものとする、第3船がどのような位置に存在すれば先行船を避航する際に考慮する必要が生じるかを知ることが重要となる。

## (2) 避航コースの選択に影響する第3船の位置

第3船が存在しない場合の追い越し船の避航コースは、避航開始時機に応じて無数に存在する。追い越し船が先行船を避航する際の側方間隔の大きさに第3船が影響を及ぼすか否かは、これらのコースのうち最も先行船に近い内側のコース、すなわち、先行船を追い越した後のコース上で、追い越した先行船に対する最大の衝突危険度が $R_{min}$ に等しくなるようなコースをとった場合に、第3船に対する衝突危険度が $R_{min}$ を越えるか否かによって知ることができる。つまり、追い越し船が上述のコース上を航行する場合に、これに対する衝突危険度が $R_{min}$ である第3船の位置の集合として描かれる境界線の内側を航行する船舶の全てが影響を及ぼす船舶となる。もちろん、この境界線は関係する各船の船型や速度により異なる。なお、以下では簡単のため、避航時の追い越し船の変針角 $\theta$ と回転半径 $r$ は一定として解析を進めるが、この条件をはずすことは容易である。

4-4-2でも述べたように、他船との衝突の危険は変針ならびに、減速による針路不安定に起因するものと考えている。衝突危険領域の大きさは変針によるものの方が大きいので、通常は変針による衝突の危険に関して避航コースの検討を行えばよい。ただし、既に追い越した先行船に対して、追い越し船はその存在を十分認識していると考えて差し支えないため、この場合については減速に起因する衝突の危険を考えておけばよい。

図4-10に示すように航路に固定した座標系 $X-Y$ を設定し、先行船“1”，追い越し船“2”，第3船“3”は、それぞれ速度 $V_1, V_2, V_3$ で航路と平行に航行するものとする。船“1”の変針による船“2”に対する修正衝突危険領域の下側境界線上で衝突危険度が $R_{min}$ である点（以下、 $R_{min}$ 点と呼ぶ）

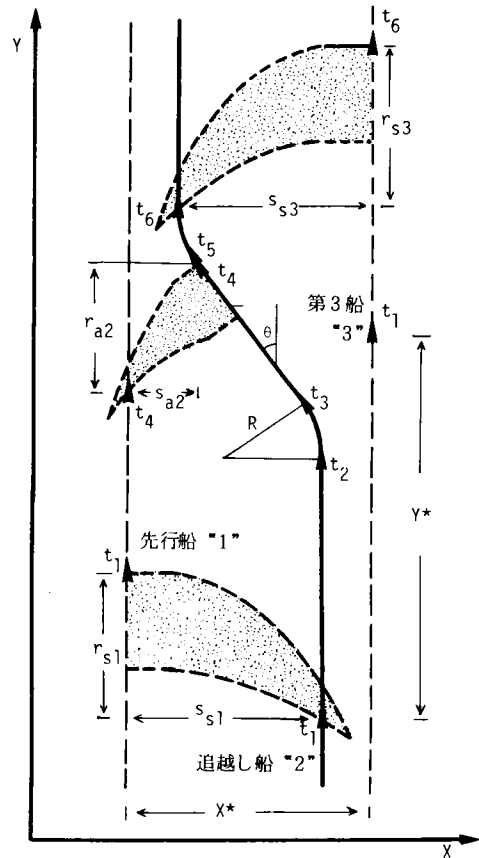


図4-10 避航コースに影響を及ぼす第3船の航行位置

と船“1”との $X$ 軸方向の距離を $s_{s1}$ 、 $Y$ 軸方向の距離を $r_{s1}$ とする。また、船“3”の船“2”に対する衝突危険領域の $R_{min}$ 点に関する同様の距離を $s_{s3}$ 、 $r_{s3}$ とし、船“2”の減速による衝突危険領域の $R_{min}$ 点に関するものを $s_{a2}$ 、 $r_{a2}$ とする（これらは4-4-2の議論に沿って求めることができる）。そうすると、船“3”が船“1”を避航する船“2”の避航コースに影響するための必要条件の1つが、

$$x_3 - x_1 < s_{s1} + s_{s3} \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

であることは明らかであろう。

さて、各船の動きを時刻 $t$ を媒介にして $x_1(t)$ 、 $y_1(t)$ 、……と記述することとすると、図4-10に記した船“2”に関する以下の時刻、

- $t_1$  : 船“1”の $R_{min}$ 点を通過する時刻
- $t_2$  : 船“1”を追い越して回頭を始める時刻
- $t_3$  : 変針角が $\theta$ に達し回頭を終える時刻
- $t_4$  : 船“1”が $R_{min}$ 点を通過する時刻
- $t_5$  : 船“3”を追い越すコースにのるための回頭を始める時刻
- $t_6$  : 船“3”の $R_{min}$ 点を通過する時刻

において、各船の位置はお互いに以下の関係にある。

$$\begin{cases} x_2(t_1) = x_1(t_1) + s_{s1} \\ y_2(t_1) = y_1(t_1) - r_{s1} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

$$\begin{cases} x_2(t_4) = x_1(t_4) + s_{a2} \\ y_2(t_4) = x_1 + r_{a2} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

$$\begin{cases} x_2(t_6) = x_3(t_6) - s_{s3} \\ y_2(t_6) = y_3(t_6) - r_{s3} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

$$\begin{cases} x_2(t_3) = x_2(t_2) - r(1 - \cos \theta) \\ y_2(t_3) = y_2(t_2) + r \sin \theta \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

$$\begin{cases} x_2(t_4) = x_2(t_3) - V_2 \cos \theta (t_4 - t_3) \\ y_2(t_4) = y_2(t_3) + V_2 \sin \theta (t_4 - t_3) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

$$\begin{cases} x_2(t_5) = x_2(t_4) - V_2 \cos(t_5 - t_4) \\ y_2(t_5) = y_2(t_4) + V_2 \sin(t_5 - t_4) \end{cases} \dots\dots\dots (4.21)$$

$$\begin{cases} x_2(t_6) = x_2(t_5) - r(1 - \cos \theta) \\ y_2(t_6) = y_2(t_5) + r \sin \theta \end{cases} \dots\dots\dots (4.22)$$

(4.16)～(4.22)式を連立させて解くと、 $t = t_1$ における船“3”と船“1”のY軸方向の相対距離 $y^*$ はX軸方向の相対距離 $x^*$ の関数として、

$$y^* = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} x^* + (V_1 - 1) t_{14} + r_{a2} + r_{s3} \\ + \{ s_{a2} + s_{s3} - r(1 - \cos \theta) \} \frac{\sin \theta}{\cos \theta} + r(1 - \cos \theta) \frac{r\theta}{V_2} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\text{ただし、} \quad t_{14} = \frac{1}{V_2 - V_1} [r_{a2} + r_{s1} + r(\theta - \sin \theta) \\ - \frac{(1 - \sin \theta)}{\cos \theta} \{ s_{s1} - s_{a2} - r(1 - \cos \theta) \}]$$

と表される。すなわち、船“1”から $x^*$ の間隔を隔て航行する第3船は、船“2”が船“1”の $R_{min}$ 点を通過する時点で $y^*(x^*)$ より手前の位置を航行する限り船“2”の避航コースに影響を及ぼすことになる。

なお、 $x^*$ の大きさによっては、追い越し後変針角が $\theta$ に至る以前に再回頭して航路と平行な針路に戻すコースとなるが、この場合も(4.19)～(4.22)式を修正するのみで、同様にして影響する位置の範囲を知ることができる。

以上の結果と(1)で得られた結果により、第3船の位置が与えられた場合、それに対応する避航コースを求めることが可能となる。

#### 4-4-4 非集計避航領域の集計化

これまでの議論から算定される避航領域は、先行船、追い越し船、第3船がそれぞれある特定の船型と速度を有し、かつ、先行船と第3船がある特定の位置関係にある場合に対するもので、いわば非集計的な値である。したがって、観測データと比較・検討するためには、集計レベルに合わせて集計化する必要がある。すなわち、到着時間間隔の分布と航路幅方向の航行位置分布から第3船がある特定の位置を航行している確率を求め、この確率分布と避航領域の分布とをたたみ込むことにより第3船の位置に

関して集計された避航領域が得られる。また、航行船舶の速度分布や船型構成分布を知ることにより、それぞれの船舶の速度や船型に関しても同様に集計された避航領域を算出できる。

#### 4-4-5 簡単な数値計算例

以上に述べた導出プロセスに沿って、第3船の相対位置関係や船舶長に関する種々の組み合わせに関してのみ集計した結果の一例を示す。

図4-11は、航路幅1000m、時間交通量40隻の航路上の、船舶長100mの追い越し船と80mの先行船に対して計算された避航領域の分布である。計算に際し、船位のばらつき $\varepsilon$ の確率密度関数は $N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ に従うものとし、 $\sigma_\varepsilon$ の値は西日本港湾運航技術研究会<sup>23)</sup>に示された航行船舶の横偏位の片振幅 $\eta_a$ と関連づけて設定した。

また、舵角の分布 $p(\delta)$ は指数分布を仮定し、操船の遅れ時間 $T$ は、発令から回頭開始までの

遅れ時間 $T_{C1}$ がその大部分を占めると考えられるため、 $T_{C1}$ に等しいとし、標準的な値を設定した。逆転制動時の $\alpha$ と最大角速度 $\psi_{max}$ は、藤井<sup>24)</sup>に示されている横方向のずれの最大値 $4L$ と非常制動距離 $10L$ 、および、停止までに要する時間と特性時間の関係から逆算して求めた。さらに、許容衝突危険度の最大値 $R_{max}$ と最小値 $R_{min}$ については、前者は第3章で開発したOSHICOP-モデルにより求められる避航失敗確率を参考として $10^{-2}$ とし、後者はこの値が航路上での衝突事故確率に反映していると考えて $10^{-4}$ とした。ただし、 $R_{max}$ については、その設定値が結果的に避航領域の大きさにほとんど影響しないことがわかっている。

図4-11の破線は従来の提唱値を示すものであるが、提案したモデルから計算した側方避航領域は、従来の側方領域の提唱値 $3.2L$ より若干小さいものとなっている。この原因の一つは、従来の提唱値が非避航船が混在するデータから求められたためと考えられる。このことについては4-6で改めて検討を加える。

### 4-5 モデルの妥当性の検討

#### 4-5-1 避航領域の直接観測の困難性

避航領域モデルの妥当性は、モデルを用いて求めた避航領域の計算値と観測結果から求めた観測値とが、どの程度一致するかにより検証される。そして、このためには観測された航跡データから避航船舶

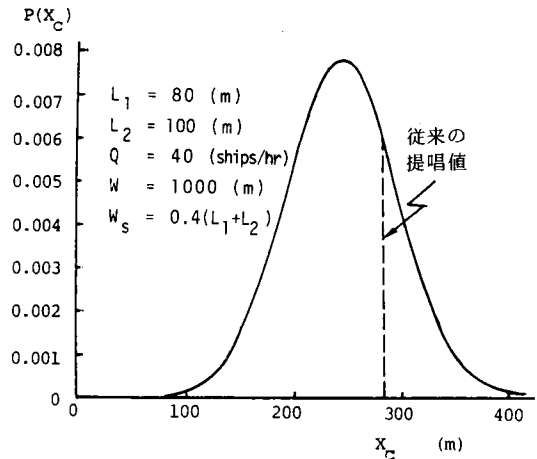


図4-11 側方避航領域分布の計算例



と非避航船舶を識別し、両船の間で避航動作が実際にとられた船舶対のみを抽出することが必要となる。操船経験が豊富であれば、航跡の形状とその時の周囲の状況から、避航動作をとったか否かをある程度見分けることができると言われている。しかし、これは、そのままの方向・速度で航行を続けると衝突に至ることが明らかな差し迫った状況下にある場合であって、避航動作をとる位置が被避航船から遠く離れているほど小さな避航動作で目的を達することができるため、より遠方からの避航であるほど判別は困難となる。また、輻輳水域では複数の船舶に対して一まとめに避航することがしばしば生じるが、この場合操船者がどの程度の遠方の状況までを判断材料とし、どの船を最終的な避航対象として選んだかを特定することは一層困難である。さらに、上述のような危険な状況に陥らないようあらかじめ船を一方の側へ寄せておくといった操船もよく見られるが、このような操船はもはや避航と呼ぶことがふさわしいかどうか定かでない。

本来その方向へ船を進めようとしていたのか、あるいは他の船舶を避けるためにやむなく進路を変えたのかは、操船者のみが知っていることであり、解析者がこれを知るためには、時々刻々の航行位置の観測と並行して個々の船舶に調査員が乗り込み、操船者が操舵命令を発するたびにその理由を問い、記録しておくことが必要となる。これは実際上不可能と言わざるをえない。これがために、観測データから直接避航領域を抽出し、計算結果と比較・検証することは、現在のところ現実的な方法と言えない。

#### 4-5-2 避航領域に基づく航過距離分布の誘導

避航領域モデルの妥当性は、先に述べた避航領域モデルが観測結果とどの程度一致するかにより検証される。しかしながら、上述のような理由によって、観測された航跡データから避航船舶と非避航船舶の識別が困難であること、および、集計のレベルが非集計的なものに近くなるにつれてデータの数が増減し、統計的な取り扱いに載らなくなってしまうこと、の2つの理由の故に、観測データから直接避航領域を抽出し、比較・検討することは容易ではない。しかるに、避航領域と航過距離分布とが対応づけられていれば、航過距離分布に関する計算結果と観測結果を比較することで避航領域に関する計算結果と観測結果との比較に代えることができ、観測された個々の船舶が避航動作をとったか否かを判別する必要のない利点がある。このような目的から、以下に、避航領域から航過距離分布を誘導する方法を述べる。

航行船舶の密度がほぼ一様であるような水域において、船型・速度に関して集計的な避航領域から航過距離分布を誘導する方法は、既に $\text{Lamb}^{25)}$ により示されている。しかし、航路計画の対象として諸種の対策が必要とされるような混雑が顕著な水域は一般に狭水路であり、船舶の密度には $\text{Lamb}$ の取り扱っているような一様性が保証されていない。また、モデルの結果を見るまでもなく、避航領域の大きさが船型に大きく依存していることは周知のとおりである。そのため、誘導にあたっては、航行位置分布、船型構成分布、速度分布を取り入れることを念頭に置くものとする。したがって、 $\text{Lamb}$ が導いた航過距離分布は、ここで誘導する分布の特殊な場合に相当することになると考えられる。さらに、 $\text{Lamb}$ の

方法と本研究の方法の相違点は、前者がある微小領域内の船舶数の増減に着目するEuler的な解析法であるのに対し、後者がある船舶の位置の推移過程に着目したLagrange的な解析法を採っている点である。この理由は、後に述べる船体運動の不確実性を考慮する場合に後者の方が記述が容易となるからである。

今、被追い越し船“1”の航路内の位置の $x$ 座標を $x_1$ 、追い越し船“2”のそれを $x_2$ とする。また、図4-12に示したように被追い越し船を原点とした座標での船“2”の $u$ 座標を $u'$ とする。航路内での航跡の $x$ 軸上での分布 $\phi_x(x)$ は正規分布に従う。

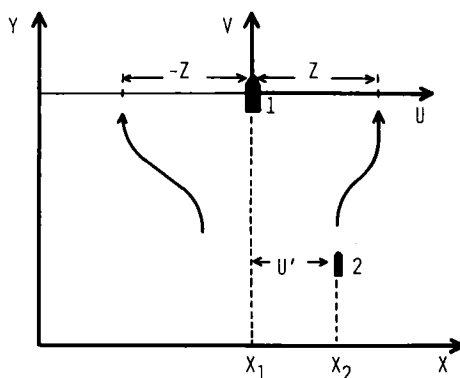


図4-12 航過距離分布誘導の際の座標系

$$\phi_x(x) = N [\mu_x, \sigma_x^2] \quad \dots\dots\dots (4.24)$$

したがって、船“1”の座標 $x_1$ を固定した場合、船“2”の航跡分布 $\phi_{u'}(u')$ は、

$$u' = x_2 - x_1$$

の関係から、

$$\phi_{u'}(u' | x_1) = N [\mu_x - x_1, \sigma_x^2] \quad (4.25)$$

に従う。今、船“2”が船“1”を追い越す場合、側方 $z$ なる距離をあけて避航したいと考えると、 $u' \leq z$ なる船は位置 $z$ を目指して避航し、 $u' > z$ なる船は避航することなく直進するものとする。このとき、避航の有無によらず、船“2”の右側方航過距離 $u$ の確率密度関数 $\phi_u^R(u | z, x_1)$ は次式で与えられる。

$$\phi_u^R(u | z, x_1) = \frac{\int_0^z f_u(u|z) \phi_{u'}(u' | x_1) dz + \int_z^\infty f_u(u|u') \phi_{u'}(u' | x_1) du'}{\int_0^\infty \phi_{u'}(u' | x_1) du'} \quad \dots\dots\dots (4.26)$$

上式を導く概念図は図4-13 (a), (b)に示されている。同様に、左側方航過距離 $u$ の確率密度関数 $\phi_u^L(u | z, x_1)$ は、

$$\phi_u^L(u | z, x_1) = \frac{\int_{-z}^0 f_u(u|-z) \phi_{u'}(u' | x_1) du' + \int_{-\infty}^{-z} f_u(u|u') \phi_{u'}(u' | x_1) du'}{\int_0^\infty \phi_{u'}(u' | x_1) du'} \quad \dots\dots\dots (4.27)$$

但し、(4.26),(4.27)式において、 $f_u(u|z)$ は、側方位置 $z$ を目指した船の船位が外力、操船性能等の不確実性の為に、 $z$ を中心としてばらつくことを示す確率密度関数で、正規分布で近似できるとすることは、4-4-2で述べたとおりである。すなわち、

$$f_u(u|z) = N[z, \sigma^2] \quad \dots\dots\dots (4.28)$$

また、 $f_u(u|u')$ も同様の意味で、

$$f_u(u|u') = N[u', \sigma^2] \quad \dots\dots\dots (4.29)$$

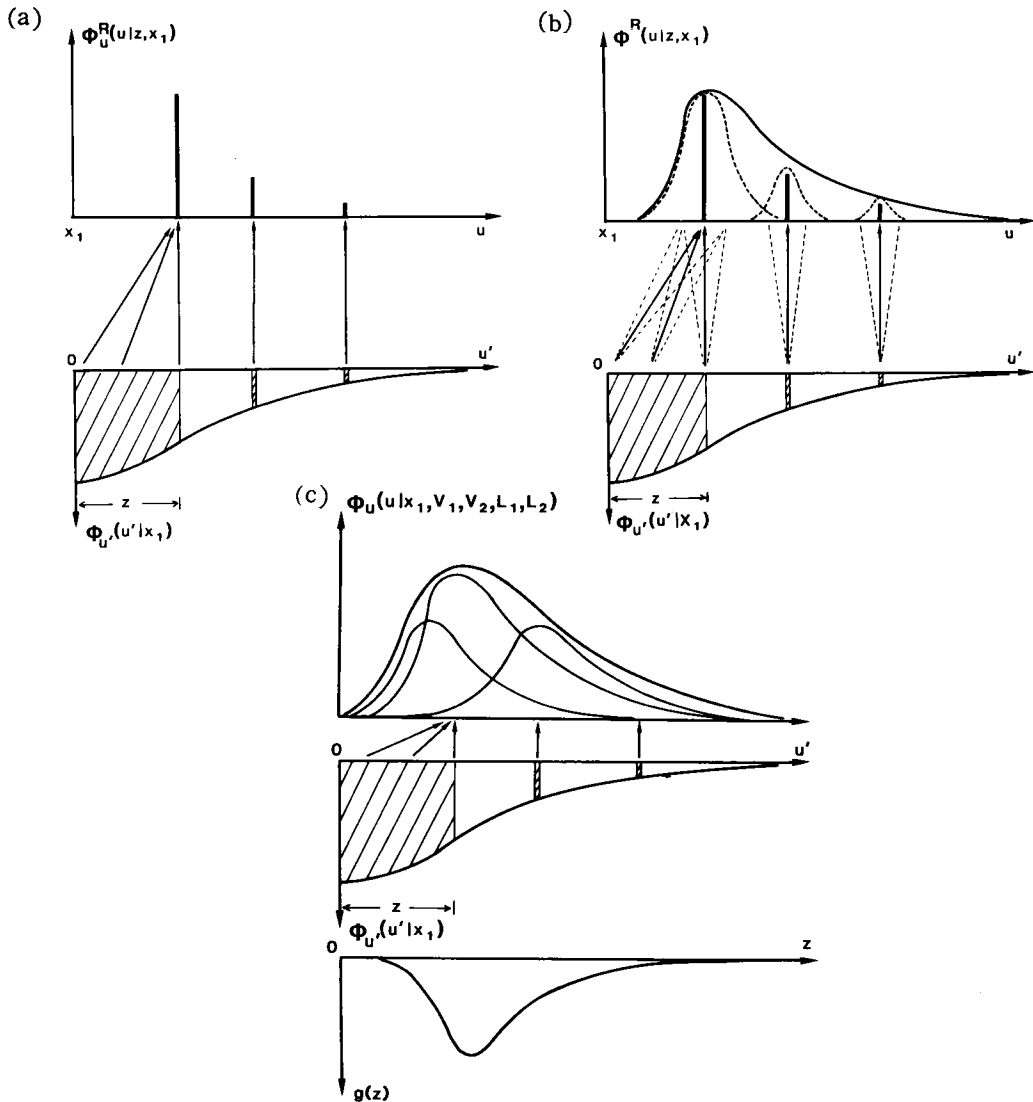


図4-13 航過距離分布誘導の概念図

で近似できる。

さて、(4.26),(4.27)式より、 $x_1$ が与えられたときの左右の航過距離の確率密度関数 $\phi_u(u|z, x_1)$ は結局、

$$\phi_u(u|z, x_1) = \phi_u^R(u|z, x_1) \int_0^\infty \phi_{u'}(u'|x_1) du' + \phi_u^L(u|z, x_1) \int_{-\infty}^0 \phi_{u'}(u'|x_1) du' \quad \dots\dots\dots (4.30)$$

で与えられる。

ところで、側方避航距離 $z$ が、追い越し船“1”と被追い越し船“2”の船型や速度、周辺状況、判断の不確実性等により、ばらついてくることは既に示したとおりである。いま、このばらつきを表わすものとして、側方避航距離の確率密度関数を $g(z|V_1, V_2, L_1, L_2)$ とすると、全ての $z$ に対し、 $(V_1, L_1)$ と $(V_2, L_2)$ なる特性をもつ2船に対し期待できる側方航過距離の確率密度関数 $\phi_u(u|x_1)$ は、(4.30)式と $g(z|V_1, V_2, L_1, L_2)$ より、

$$\phi_u(u|x_1, V_1, V_2, L_1, L_2) = \int_{-\infty}^\infty \phi_u(u|z, x_1) g(z|V_1, V_2, L_1, L_2) dz \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

で与えられる。(4.31)式の場合図を図4-13(c)に示す。ところで、以上の現象が発生するのは $V_2 > V_1$ になる船型 $L_2$ の船に限られる。船型 $L$ の船舶の航行速度が $V$ である確率密度関数は、藤井<sup>26)</sup>の結果を用いて、

$$f_V(V|L) = N[\mu_V, \sigma_V^2] \quad \dots\dots\dots (4.32)$$

で与えられる。従って、(4.31)式に前述した条件 $V_2 > V_1$ を考慮すると、 $V_2 > V_1$ の船型 $L_2$ の航過距離の確率密度関数 $\phi_u(u|x_1, V_1, L_1, L_2)$ は次のようになる。

$$\phi_u(u|x_1, V_1, L_1, L_2) = \frac{\int_{V_1}^\infty \phi_u(u|x_1, V_1, V_2, L_1, L_2) f_V(V_2|L_2) dV_2}{\int_{V_1}^\infty f_V(V_2|L_2) dV_2} \quad \dots\dots\dots (4.33)$$

さて、被追い越し船の位置 $x_1$ は、先にも述べたように、正規分布 $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ に従うと考えられるので、(4.33)式より、被追い越し船の位置や速度を特定化しない場合の航過距離の確率密度関数 $\phi_u(u|L_1, L_2)$ が次式で与えられる。

$$\phi_u(u|L_1, L_2) = \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \phi_u(u|x_1, L_1, L_2) f_x(x_1) f_V(V_1|L_1) dV_1 dx_1 \quad \dots\dots\dots (4.34)$$

式(4.34)は、航路上で船型 $L_1$ の船を船型 $L_2$ の船が追い越す場合の平均的な側方航過距離の確率密度を与えたものである。

(4.34)式を厳密に観測データで検証する為には、船型対 $(L_1, L_2)$ ごとの膨大なデータを必要とする

ので、観測データで検証可能な形式にする為に、追い越し船と被追い越し船の船型をランク毎に考えておくに便利である。その為に、被追い越し船の船型が  $L_1$  が、 $L_1^* \leq L_1 \leq L_1^{**}$ 、追い越し船の船型が  $L_2^* \leq L_2 \leq L_2^{**}$  の範囲で観測されたとすると、この船型ランク対での航過距離の密度関数  $\phi_u(u)$  は、

$$\phi_u(u) = \frac{\int_{L_1^*}^{L_1^{**}} \int_{L_2^*}^{L_2^{**}} \phi_u(u | L_1, L_2) \phi_L(L_1) \phi_L(L_2) dL_2 dL_1}{\int_{L_1^*}^{L_1^{**}} \int_{L_2^*}^{L_2^{**}} \phi_L(L_1) \phi_L(L_2) dL_2 dL_1} \dots\dots\dots (4.35)$$

ただし、 $\phi_L(L)$  は対象交通流の船型構成分布の確率密度関数である。

#### 4-5-3 検証データの概要

対象水域は香川県乃生岬沖の備讃瀬戸東航路であり、図4-14に示した幅2000m、延長5000mの区域を航路とほぼ平行に(AA', BB')の両方を横切って航行する西行船が対象船舶である。用いた観測データ<sup>27)</sup>は48時間分、西行船総数は350隻、うち本区域内での追い越しは90件であった。データはレーダー写真からデジタイザーで読み取られた2分間隔の座標値から3次のSpline補間により滑らかな航跡を作成した。そして、対象区域内で追い越しあるいは追い抜き関係となった船舶対を抽出し、追い越し船が先行船の真横(X座標が一致)に來た時点における両船の間隔を読み取り、これを側方航過距離の観測値とした。

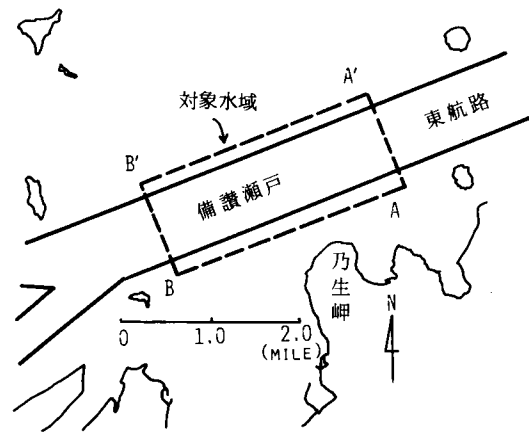


図4-14 検証のための対象水域

一方、計算値を求めるにあたり、船型構成分布を規定するパラメータと時間平均交通量については観測値から求めた値を入力し、航路幅も実際の値とした。許容最大ならびに最小危険度は、4-4-5と同様に、OSHCOP-モデルによる避航失敗確率と衝突事故確率の値を参考に、それぞれ $10^{-2}$ 、 $10^{-4}$ に設定した。また、先行船の変針舵角の分布は指数分布を仮定し、3-2で述べた遅れ時間 $T$ については操縦性指数に基づいて $T_c$ を設定した。 $\tau$ は $T_c$ に比してかなり短い値と考えられるため、今回はこれを0とした。なお、演算時間の関係で、速度は船型に応じて一定値をとるものとした。

#### 4-5-4 結果の比較と考察

図4-15の(a)～(d)に計算値と観測値を船型ランク別に累積分布で比較した結果を示す。適合度に関するKolmogorov-Smirnov検定を行ったところ、本モデルはすべて有意水準5%あるいはそれ以上で妥当であるとの結果を得た。なお、 $\chi^2$ 検定によらず本検定によった理由は、サンプル数が多くない本

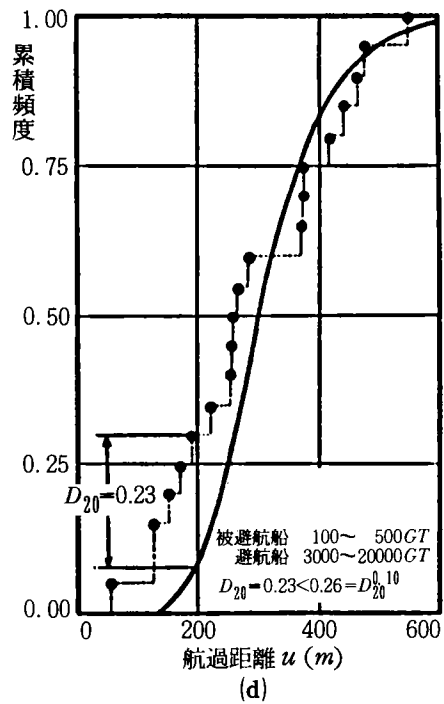
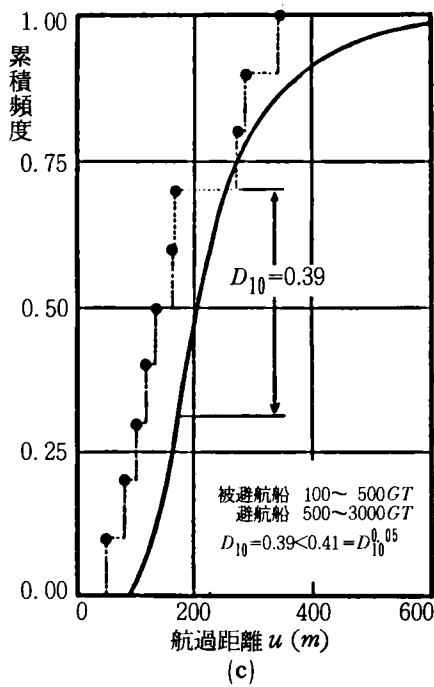
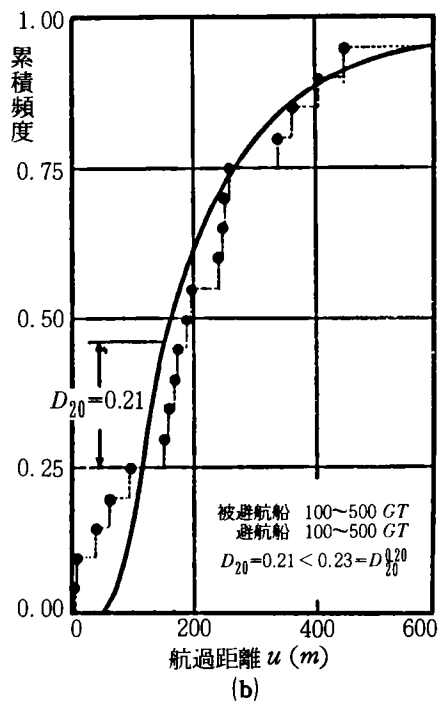
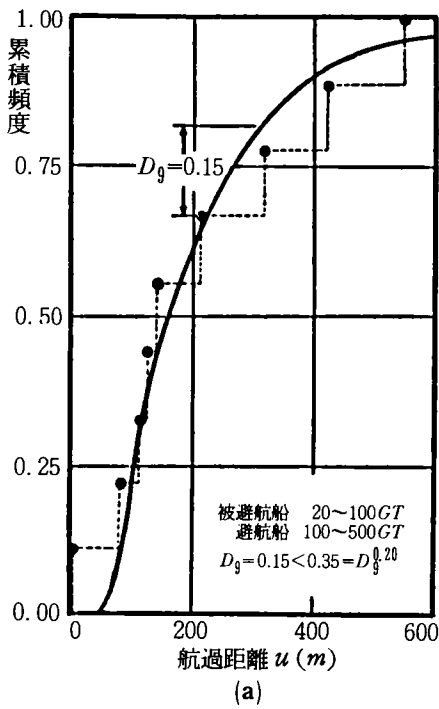


図4-15 船型ランク別航過距離分布の計算値と観測値の比較

研究のような場合に、データを各区間に分ける必要がないという利点を有し、したがって区間の数や区間毎の理論度数の小さい値に対しても $\chi^2$ 分布を仮定するといった問題が起こらないためである。

また、図4-16には全ての船型について集計した航過距離の密度分布の比較を示す。こちらは $\chi^2$ 検定を用い、有意水準10%で妥当性を欠くことは無いとの結果を得た。

ところで、提案した避航領域モデルには未だ多くの単純化や、観測値とは必ずしも対応づけられていないパラメータなどが存在して

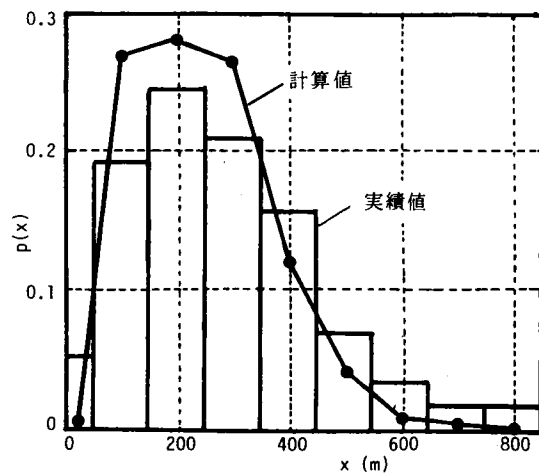


図4-16 全船型に関する航過距離分布の計算値と観測値の比較

いる。また、比較されるべき航過距離分布の観測値には、レーダーの解像度に起因する誤差、デジタイザーによる座標読み取り誤差、Spline 補間の際に混入する誤差などが含まれ、計算値にもモデルで用いている船型構成分布や航行位置分布などの種々の分布と実現値の分布との乖離による誤差をはじめとする数多くの誤差が含まれている。したがって、現段階で両者がよい一致を見たと言っても、それが直ちにモデルの妥当性を示すわけではない。しかしながら、さまざまな船型ランク毎に、あるいは異なった水域や交通量の下で、それぞれある程度以上の適合性を見せるならば、誤差が正負バランスしているという意味で現象説明力を有すると言うことができよう。

#### 4-6 結 語

避航領域は、交通流の全体的挙動に大きく影響する避航時の挙動を把握し、記述する上で極めて有用な概念である。しかし、これまで避航領域の概念そのものに関する議論が十分でなかったために、数多くの研究者によって提案されてきた諸数値は、いずれも交通流の全体的挙動を推定するための基礎概念としての妥当性を欠いていた。そこで本章では、避航領域の本質に立ち戻ってその概念を再検討するとともに、所与の航行環境の下でのその大きさを推定するための非集計的なモデルを提案した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 避航領域の記述の形式について考察を加え、交通流を再現するためのシミュレーション・モデルの構築や実用交通量算定に用いるために具備すべき要件を示した。
- (2) 避航操船時の船体運動と避航操船プロセスに内在する種々の不確実性の双方を考慮に入れた形で、操船者が持つ衝突危険度を定量化した。

- (3) 避航操船の際の操船者の意思決定プロセスとそれに基づく避航コースの選択行動を、安全性の代替指標である衝突危険度を用いてモデル化した。
- (4) モデル化された避航コースの選択行動を介して、船舶交通流と航路の諸特性から同航時の避航領域を算定するモデルを開発した。
- (5) 同航時側方航過距離分布の誘導法を示し、航行実態観測結果を用いて避航領域分布の適合度を検証する方法を提示した。

しかしながら提案したモデルでは、全てにわたって十分な検討ができたわけではなく、今後の課題として、

- (1) 避航操船の際の操船者の効用関数をはじめとするモデルを構成する諸関係式のうち、実態との対応づけが十分でないものに関しては、観測結果等からこれを明らかにすること。
- (2) 複数の先行船をあらかじめ船群として認識し、その全体に対して避航を行うといった操船者の大局的判断の記述が可能となるようなモデルの改良が望まれること。
- (3) 異なる水域や交通量の下での航過距離分布の観測結果を解析し、モデルの妥当性を更に検証すること。
- (4) 集計化の過程で何重にもわたる確率分布のたたみ込みに比較的長い演算時間を要するため、プログラムの効率化を行うこと。

などが残されている。

なお、本章では同航船による追い越しの場合のみを対象として避航領域の算定に関する議論を展開した。行き合いや横切りの場合についても、操船者の意思決定に影響する要因が同航船に対するものと異なるため、モデルの具体的な内容は変わってくるものの、解析にあたっては基本的に本章で提案した方法論にのっとり、全く同様に検討を進めることが可能であると考えている。

## 参考文献

- 1) 喜多・黒田・小川：対象船の航行不確実性を考慮した避航領域同定モデル，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.121～122，1984
- 2) 黒田勝彦・喜多秀行：分布としての避航領域と航過距離分布の解析，日本航海学会論文集，No.72，pp.1～11，1985
- 3) 黒田勝彦・喜多秀行：避航領域の確率論的取り扱いについて，土木計画学研究・講演集，No.7，pp.331～338，1985
- 4) 松井孝幸ほか：浦賀水道航路を航行する船舶の後方閉塞領域について，電子航法研究所報告，



No.46, pp.27 ~ 51, 1984

- 5) 藤井弥平ほか：船舶の閉塞領域について，日本航海学会誌，No.35, pp.71 ~ 76, 1966
- 6) 藤井弥平：避航領域についての一考察，日本航海学会誌，No.44, pp.49 ~ 58, 1970
- 7) 杉崎昭生：閉塞領域の一考察，日本航海学会論文集，No.48, pp.147 ~ 154, 1972
- 8) E. Goodwin : A Statistical Study of Ship Domains, J. of Nav.Vol.28, No.3, pp.328 ~ 344, 1975
- 9) 早藤能伸：東京湾口を航行する船舶相互間の位置関係に関する解析，港湾技術研究所報告，Vol.22, No.1, pp.97 ~ 117, 1983
- 10) 奥山育英・早藤能伸：レーダー写真による閉塞領域の解析について，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第4部，pp.11~12, 1982
- 11) 藤井弥平：避航領域の定義について，航海，No.65, pp.17 ~ 22, 1980
- 12) 運輸省第二港湾建設局・日本海難防止協会：東京湾船舶航行実態調査報告書，pp.138 ~ 141, 1976
- 13) 鞠谷宏士：船の衝突回避限界について，日本航海学会誌，No.36, pp.87 ~ 90, 1967
- 14) 原 潔：避航開始距離について，神戸商船大学紀要，No.18, pp.25 ~ 34, 1971
- 15) 杉崎・大津：運動学的に見た衝突現象-I，日本航海学会論文集，No.50, pp.85 ~ 90, 1973
- 16) 原 潔：避航能力と避航限界，避航操船シンポジウム，pp.7 ~ 24, 日本航海学会，1977
- 17) 渡辺健次：後方閉塞領域の導出とその例（第1報），船舶技術研究所報告，Vol.3, No.5, pp.53 ~ 57, 1966
- 18) 今村純也：閉塞領域に関する一考察，日本航海学会論文集，No.70, pp.11 ~ 18, 1984
- 19) 今津隼馬：他船の行動変化を考慮した衝突危険度について，日本航海学会論文集，No.64, pp.73 ~ 78, 1981
- 20) 長尾義三：土木計画序論，共立出版，p.216, 1972
- 21) 西日本港湾運航技術研究会：航路計画調査 一長大航路における航路幅員決定一，pp.37 ~ 48, 1964
- 22) 神戸商船大学港湾運航技術研究会：瀬戸内海航路の余裕水深と航路幅員に関する調査報告書，pp.37 ~ 48, 1964
- 23) 前出 21), pp.69 ~ 104
- 24) 藤井弥平：序説海上交通工学，海文堂，pp.35 ~ 39, 1971
- 25) W. G. P. Lamb : The Estimation of the Mean Size of Ship Domains, J. of Nav., Vol.36, No.1, pp.130 ~ 136, 1983

26) 前出 24), p.32

27) 運輸省港湾技術研究所設計基準部システム研究による調査データ, 1976

## 第 II 編

航路の計画・設計・管理の方法論に関する研究

## 第5章 航路計画の方法論に関する一般的考察\*

### 5-1 概 説

戦前・戦後を通じて港湾整備が進められた結果、港湾における混雑はかなりの程度解消を見るに至り、海上交通のネックは多方面からの海上交通が集中する狭水道等に移ったかの感がある。実際、我が国でも、浦賀水道航路や明石海峡航路、あるいは備讃瀬戸航路といった主要航路では既にかかなりの輻輳が生じており、二船の出合いのみを想定した現行の海上衝突予防法では対処できない事態も発生している。それにもかかわらず、上述のごとき事態に直面した場合、現在では操船者の臨機の判断にのみ頼って何とか危険が回避されることを期待する以外にさしたる手立てがない。このような危険な状態を解消し、かつ円滑な海上交通の疎通をはかるという航路本来の機能をより一層発揮させるための有力な方策の一つとして、航路整備や航行規制が要請されてきている。

しかしながら、航路整備や航行規制を実施して航路の機能をより高いものにしようとする際には、以下の事項に明確な解答が用意されていることが必要である。すなわち、

- ① 航路計画の目的と言われる“安全かつ円滑な船舶航行の確保”なる言葉が具体的に何を意味するか。
- ② 結果として実現する交通状態の“望ましさ”あるいは“航路計画の目的の達成度”をどのように測定し、いかに定量的に表現するか。
- ③ 望ましい交通状態を実現するためには、どのように航路諸元を決定すればよいか。

という3点である。この3つの事項のいずれに対してもこれまであまり議論されることがなく、したがって十分な解答が与えられなかったがために航路計画を合理的に策定する方法論が確立されなかったように思える。その結果、航路に何か手を加えて交通の状態を幾分かなりとも改善しようとする時にも部分にのみ目が向けられがちとなり、全体を見通した適切な計画を策定してきたかは疑問の残るところである。

上記の諸点を明らかにするためには、一旦出発点に立ち戻って、航路計画の基本的事項を再度整理し直すことがまず必要となろう。そして、この作業の結果得られた視点からこれまでの計画法を眺め、不十分であった点についてはこれを補う考え方を導入する。しかる後、計画策定の手順に沿ってこれらを再構成し、航路計画の方法論とすることが有効なアプローチと考えられる。

そこで、本章では、まず第2節で航路計画の目的・主体・対象に関する整理を行う。次いで第3節で従来の航路計画の方法と航路諸元の標準的な数値の与え方を概観し、第2節の結果に照らしていくつかの問題

---

\*本章の一部は文献1)、2)として発表している。

点を指摘する。第4節では指摘した問題点に対する著者の考え方を述べ、本研究で提案する航路計画の方法論の特徴を明らかにする。そして、ここで示される考え方の1つであるリスク分析の方法を参考にし、第5節では本研究で提案する航路計画の基本的枠組みを示す。

## 5-2 航路計画の基本的考え方

### 5-2-1 航路計画の基本要素

「計画」なる語は2つの意味を有している。1つはある主体がある目的を達成するための思考の結果として得られた手段や方法の一連の配列であり、他の1つはこの結果を得るまでの思考過程である。通常、前者の「計画されたもの」を plan, 后者の「計画すること」を planning という<sup>3), 4)</sup>。本研究では「航路計画」を plan の意味で用い、planning の意味を持つものとして「航路計画法」ないしは「航路計画の方法論」といった語を用いる。さて、佐佐木<sup>5)</sup>は「自然の成行きのままに放置しておいて、なんら矛盾を生じないようにであれば計画の必要性はない」と指摘しているが、これから逆に、なんらかの矛盾が生じる場合、すなわち計画の策定が要請される場合には「誰が、何を、どのような姿にしたいのか」といったことが必然的に具現化しているものと考えられる。言葉を変えると、これらは計画の基本要素となる主体（誰が）、対象（何を）、目的（どのような姿にしたいのか）にそれぞれ対応づけられる。したがって、航路計画を策定する場合においても、まず、これら3要素を明らかにしておくことが必要である。これらが明らかにされた後、それでは、対象のどこをどのように変えれば目的が達成されるかということについて検討を加え、その結果として取るべき「手段（どうするか）」が選定される。これより航路計画の方法論は、航路計画の「主体・対象・目的」なる3要素から「取るべき手段」を求める作業、あるいは、さらに、上記3要素を明らかにする作業を含めた一連のプロセスをその内容としていることが理解されよう。加納<sup>3)</sup>はこれを計画の「構成」と呼び、主体・対象・目的・手段・構成をもって計画の5要素としている。

### 5-2-2 航路計画の目的と航路が有すべき機能

一般に、計画の目的とは、対象とするシステムを自然の成り行きのままに放置しておくことにより将来現出することが予想される状態から、理想とする状態へとシステムを推移させようとする、その内容をいう。これは、当初、漠然とした願望の形を取ることが多いが、徐々に明確化を図っていくことにより、ひとつの計画目的として設定することができる。また、計画策定の当初は、何からどのように手をつけてよいかわからず、問題解決の糸口が見いだせないということがしばしば経験されるが、これは計画目的が未だあいまいであることに起因している場合が多く、目的が具体的に示されるにつれて、検討すべき事項も自ずから明瞭となってくることが少なくない。

さて、Wohl and Martin<sup>6)</sup>は交通工学の定義として「交通工学は人および物の安全かつ迅速、快適、

便利、経済的な移動を供給する方法を見いだすための科学的な原理・道具・方法・技術の応用である」と述べている。これから“安全性”，“迅速性”，“快適性”，“便利性”，“経済性”の5つが交通に求められる要件であることが理解される（これ以外に，確実性，大量性等が加えられることもある<sup>7)</sup>）。そして，明示されてはいないが，上述の科学的な原理・道具・方法・技術は，これらに支えられた交通計画を通して安全かつ迅速，快適，便利で経済的な移動を供給しうることは言うまでもない。したがって，航路計画は，そこを利用する海上交通の安全性，迅速性，快適性，便利性，経済性の向上を図るといふ航路の機能を十分に発揮させることが目的となる。

ところで，これまでに策定された航路計画では，いかなる目的が設定されていたのであろうか。我が国では，港湾区域内に位置する航路を除き，航路は主として港湾法に基づく開発保全航路として整備されてきた。港湾法には航路計画の目的として特段の規定はなく，港湾法の目的として，「この法律は，交通の発達および国土の適正な利用と均衡ある発展に資するため，（中略），航路を開発し，および保全することを目的とする」とある。一方，同法第3条の2第1項の規定に基づく基本方針<sup>8)</sup>では，開発保全航路の開発の方向として，「船舶の安全かつ円滑な航行の確保を図るため，（中略），必要に応じ，新規航路の開削，拡幅，増深または航路法線の改良などを行う」としている。この両者を比較すると，前者の「交通の発達及び国土の適正な利用と均衡ある発展に資するため」は，どちらかというところ，航路計画の究極的な目的といった感があり，後者のほうが当面念頭に置いておくべき航路計画の目的と受け取れる。また日本港湾協会<sup>9)</sup>には「航路の計画にあたっては，安全な航行，操船の容易さ，（中略），等を考慮することとする」との記述がある。さらに，個々の航路計画に目を向けると，「航行船舶の増加による航路の輻輳を緩和し，海難事故の発生を防止するため」(運輸省港湾局<sup>10)</sup>)，あるいは，「海難事故の防止ならびに船舶交通の輻輳を緩和し，更に，船舶交通の安全に資するため」，「船舶航行の安全をはかる」，「航行の安全をはかり常時航行可能なものとするため」(いずれも，運輸省港湾局計画課<sup>11)</sup>)といった表現が見られる。また，航路計画そのものではないが，Matthews and Tresfon<sup>12)</sup>は各国の海上交通システム（Vessel Traffic Service System）の設置者に対するアンケート調査を行い，海上交通システム設置の目的として「交通の安全性」，「交通流と港湾管理の効率性」，「環境汚染の防止」，「航行の支援」という回答が多く見られたと報告している。

この様に，従来の航路計画では，特に計画目的として明示されてはいないものの，「安全な航行」，「円滑な航行」，「輻輳の緩和」，「容易な操船」等が計画の目的とされているようである。しかしながら，“安全”，“円滑”，“容易”といった語が何を指すかは明らかでない。例えば，死者を伴う事故の防止とタンカーの事故の防止はいずれも安全性を向上させるが，人命尊重の立場からは前者が，海洋汚染防止の立場からは後者が選択されることとなろう。すなわち，その内容を明示しない単なる「安全性の向上」といった目的の下では，どちらの減少化を目指すべきかを選択しえない。また，“円滑化”が頻繁な避

航操船を伴う高速航行と、追い越しが生じないよう一定速度に減速することのどちらにより達成されるかも不明である。

この意味で、Agerschou<sup>18)</sup>が航路の拡張と屈曲緩和の目的として挙げている以下の4項目は上記と比較してやや具体的である点で注目される。

- a) 乗り揚げと衝突の発生を減少させる
- b) 夜間航行を可能とする
- c) 航路の通航に要する時間を短縮する
- d) 2つのレーン上の同時航行を可能とする

このうち、b) はすでに夜間航行が可能な航路では必要がないであろうし、d) は混雑による待ち時間を遅れと見なせばc) に含まれるため、場合によってはa)とc)のみを目的とすることも可能と考えられる。これは一例にすぎないが、いずれにせよ、計画目的は先に挙げたものの一部ないし全てとするとしても、その意味内容を可能なかぎり具体的に明示した目標へとブレイク・ダウンしておくことが望ましい。

### 5-2-3 航路計画の計画領域

航路計画の内容は、次の3種類に大別することができる。

第1は、航路の形状に係わるものであり、可航幅、航路水深、法線の形状といった要素によって規定される。本研究ではこのカテゴリーに属する要素を設定することを総称して「航路施設計画」と呼ぶこととする。これは、航路を利用する立場および航路を整備する立場から望ましい航路形状を探ろうとする行為であって、あるいは航路設計と呼ぶ方がふさわしいかもしれない。

第2は、航路上を航行する船舶の通行方法に係わるものであり、航行位置、速度制限、航行管制の有無などの要素によって規定される。同様に、このカテゴリーに属する要素を設定することを総称して、「航路利用・管理計画」と呼ぶこととする。

第3は、「航路施設計画」と「航路利用・管理計画」を実現するための方法に係わるもので、計画実施に携わる組織や関係者の合意形成と補償、財政計画、作業管理計画などからなる「実施計画」である。

第1と第2のものは、5-1で述べた計画の「手段」に当たるものであり、第3のものは、これを取りまく諸条件の整理である。以後、本研究では、「航路施設計画」と「航路利用・管理計画」の両者をもって(狭義の)航路計画と考え、「実施計画」については当面、研究対象としては取り扱わないこととする。

次に、「航路計画の構成要素」と「航路計画の前提条件」について述べる。

「航路計画の構成要素」とは、上に述べた意味での航路計画を規定する要素をいい、これらを全て設定することにより、対象航路の姿を一意的に規定しうようなものをいう。すなわち、航路計画上操作可能な変数であり、計画変数といってもよい。航路施設計画と航路利用・管理計画に分けてその構成要素を列挙したものが表5-1である。一方、「航路計画の前提条件」とは、航路計画を策定する際の前

表5－1 航路計画の構成要素

(1) 航路形状	航路法線, 航路幅, 航路水深, 航路交差角, etc.
(2) 航行援助施設	航路中央分離表示, 航路側端表示, 導灯, 導標, etc.
(3) 航行規制	航行分離, 通航区分, 最高速度制限, 最大船型制限, 通航時間制限, 優先航路, etc.

表5－2 航路計画の前提条件

(1) 気象・海象	風(風向, 風速), 潮流(流速, 流向), 視界, 波浪, etc.
(2) 水路特性	最小水路幅, 屈曲, 浅瀬, 人工構造物, 水深, 底質, etc.
(3) 交通特性	日平均時間交通量, 交通量日変動, 交通量週変動, 船型構成, 船種構成, 航行速度分布, 最大船型(幅, 吃水, 船舶長), 漁船の操業, 標準的な航法, etc.
(4) 船舶特性	操船性能, レーダーの装備, 衝突防止機器の搭載, etc.
(5) 防災体制	流出油処理船の配備, 流出油処理器材の配備, 消防艇の配備, etc.
(6) 水域利用状況	養殖場の存在, 船舶の停泊・避泊水域, 周辺沿岸域の社会・経済活動, etc.

提となる条件で、この条件が他のものに変わった場合、航路計画の姿そのものを変える可能性を持つ条件である。このような条件は数多く存在し、航路計画の際に占める重要性も様々であるが、大別すると表5－2のように分類できる。

なお、上記は変更・操作することが可能か否かという観点から分類したものであるが、場合によっては構成要素であったとしても変更の対象とはしないこともある。このような場合は、もちろん前提条件と同様に見なすことになり、また逆の場合もありうるが、いずれにせよ検討の対象からもれることのないように留意しておくことが要請される。

以上は、いわば航路計画の空間的な領域に関するものであるが、時間的な計画領域もまた重要な検討項目である。

計画の対象とする航路上を航行する船舶交通や、航路をとりまく社会・経済環境は年々変化してゆく。このように状況が変化するなかで、どの時点(計画目標年次)の状況を対象として計画を策定するかが定められて初めて将来の状況と理想像との乖離が特定化され、目的の設定が可能となる。また、航路に限らず、一般に交通施設は特定の一時点のみでなく、一定の期間にわたってサービスを提供する性質の



ものであるため、定められた期間を通じて所定の効果が発揮されるか否かが評価されることが多い。さらに、航路を段階的に整備していくような場合にも、長期にわたって評価がなされる。このような場合には「計画目標年次」でなく「プロジェクトライフ<sup>14)</sup>」の概念を用いることが有用となる。プロジェクトライフは評価の対象となる計画・建設・供用期間を意味し、物理的、機能的、経済的、法的耐用年数などに基づいて規定される。我が国では国土総合開発審議会で一応の案として示された耐用年数として、100年（漂砂や流入河川がない航路）、ないしは30年（漂砂や流入河川がある航路、10～50年の範囲をとる）があり、アメリカでは50年（水路港湾）という期間が用いられている。<sup>15)</sup>

なお、将来の交通状況の予測に関する不確実性の存在を考慮にいて動学的な立場から計画を策定する場合は、「計画目標期」についても検討しておくことが重要である。<sup>16), 17)</sup> 長期的な視野を持つことにより効率性は増大するが、予測が長期にわたるにつれて予測誤差に伴う不効率性が発生するため、将来を見通す期間を適切に定め、効率よい計画を策定することが望まれる。

#### 5-2-4 航路計画の計画主体と評価主体

航路における船舶の航行にはさまざまな関係者が関与しているため、航路計画策定の際には考慮に入れるべき立場あるいは影響者を明確にしておかなければならない。これらは、

- ① 航路を利用し、サービスを受けるもの（利用者）
- ② 航路を整備・管理し、サービスを提供するもの（提供者）
- ③ 航路を含む周辺沿岸域を利用するもの（影響者）

に大別することができる。

①は、操船者（船長・航海士・パイロット）や船主・船社、さらには人や貨物の輸送を通じて社会・経済活動を営むもので、いわば航路の利用者と言える。利用船舶の種類（大型船、小型船、危険物輸送船など）から利用者を分類することができ、それぞれ競合関係を形成することもある。②は、交通施設としての航路を管理するものと交通施設を利用する海上交通を管理する者からなる。航路は通常公有水面に存在するため“管理者”という概念にはなじまないが、これを道路と対照すると道路管理者と交通管理者に相当する。我が国では、港湾区域においては港湾管理者が双方を管理し、それ以外の水域では運輸省が施設面における航路管理を、海上保安庁が交通の管理に携わっている。また、諸外国では両者を兼ねている機構も見られる。航路計画を策定する際には、一般に、提供者が計画主体となる。③は、航路および周辺水域で操業する漁業従事者やプレジャーボートの利用者、あるいは水産物を養殖する者、沿岸で経済活動や生活を営む者などである。

これらは、すべて航路計画の評価主体となりうる。そして、どの範囲の立場までを積極的な評価主体として計画に取り入れるかにより計画の内容あるいは合意形成のあり方も変わる。すなわち、積極的な評価主体となる立場についてはそれぞれの観点から見た計画の望ましさになるべく大きくなるように代

替案が作成され、選択されるが、そうでない単なる影響者となる立場の者に対しては、望ましが現状より小さくなりさえしなければ反対が生じることもなく、よしとされる場合もある。

評価項目は、一般にそれぞれの評価主体によって異なる。航路の利用者は、安全性・迅速性といった面に主たる関心を抱いており、提供者は航路の整備と維持・管理に要する投資額に関心を向ける。また影響者については航行の自由度の大きさという面での快適性、あるいは海洋汚染の発生につながる事故危険度の変化に重きを置いた評価を下す傾向にある。ただし、先にも述べたように、提供者は計画の主体となっていることが多いため、通常、計画主体としての立場から他の立場の意向をも統合して計画を評価する。

このように、航路計画も他の公共事業の計画と同様に、複数の評価主体が存在していることに意を払っておくことが重要である。

### 5-3 従来の航路計画の方法論

#### 5-3-1 航路計画策定のフロー

航路計画策定のための方法論は未だ確立されていないといってよい。しかし、その一部分、あるいは全体の体系化を図ろうとした試みはいくつか目にする事ができる。ここでは、その中から2つのフローを紹介する。

運輸省<sup>18)</sup>は、一般的な航路設計の流れとして図5-1のような関連図を示している。これは、構想—基本計画—実施計画—運営管理という、5-2-2で述べた意味での「実施計画」に着目し、航路施設計画を構成する要素間の関係に重点を置いて整理したものである。図中破線で囲んだ部分がほぼ本研究で取り扱う領域に相当する。図5-2は、このうち船舶諸元や海象・気象・地形などと、航路設計の主要3要素とされている航路法線・航路水深・航路幅員との関連を示したものである。

図5-3は栗栖<sup>19)</sup>により航路計画の手順として示されたものである。本手順は、航路幅員、航路水深および航路法線を決定するためのもので、5-2-2で述べた「航路施設計画」に相当するが、航行規制についても考慮が払われている。図からも理解されるように、港湾の配置計画が与えられることにより、まず、当該航路を航行する船舶の船型を定める。次いで、船型と地形・地質からの航行規制の方式が定められると共に操船面の挙動を考慮して航路幅員を定め、また、吃水の分布や船体沈下量を知ることによって航路水深を定める。しかる後、これらを統合して航路法線を決定し、これを安全性、経済性、輸送効率などから評価する。評価の結果望ましい航路形状と見なされると計画が決定され、そうでない場合はフィードバックして再度検討を加えるものとしている。

#### 5-3-2 航路の諸元

我が国の現行の航路計画における航路諸元は、概ね省令に基づく技術上の基準<sup>8)</sup>に準拠して設定され



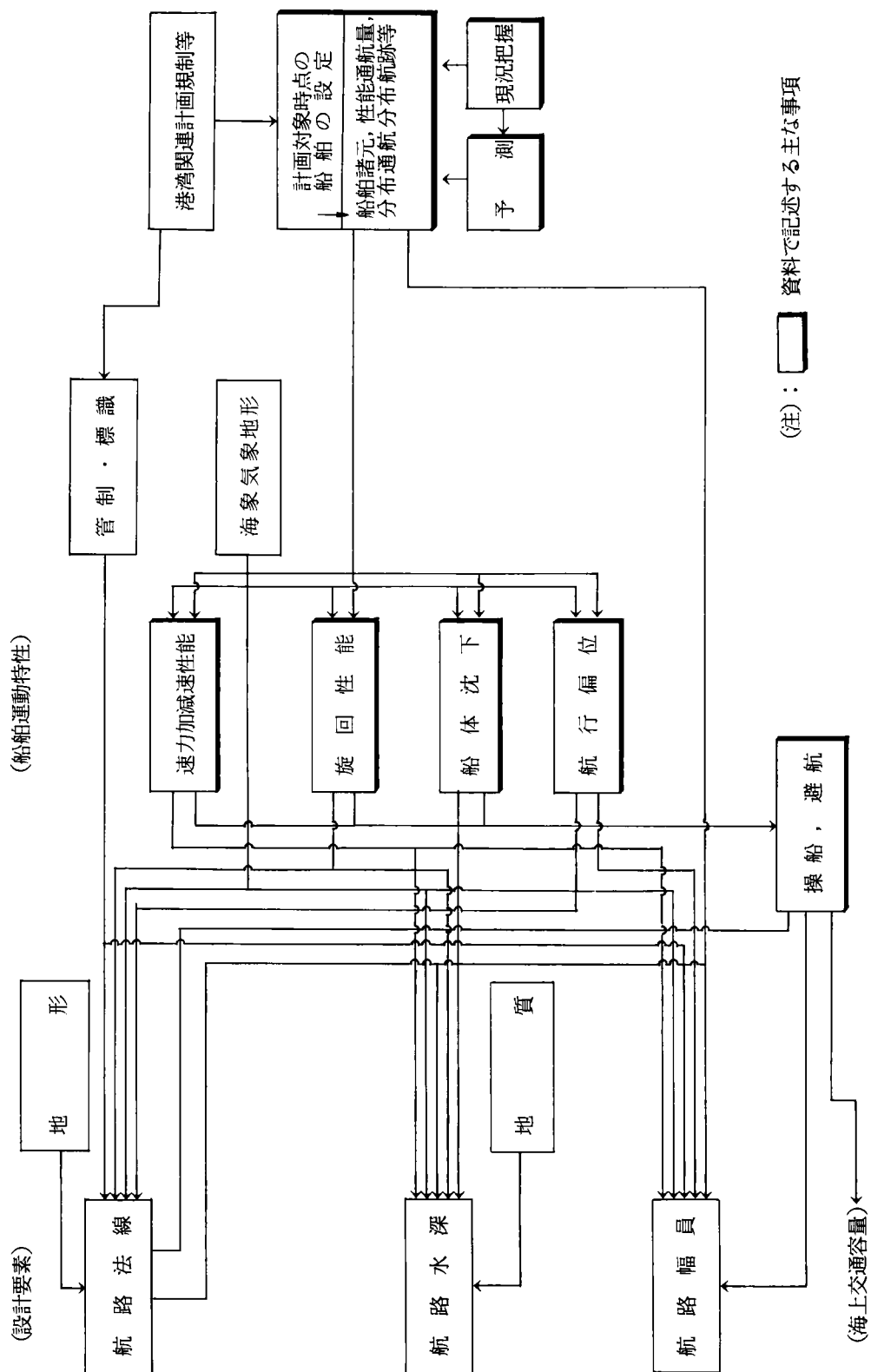


図5-2 運輸省<sup>18)</sup>による航路設計の流れ

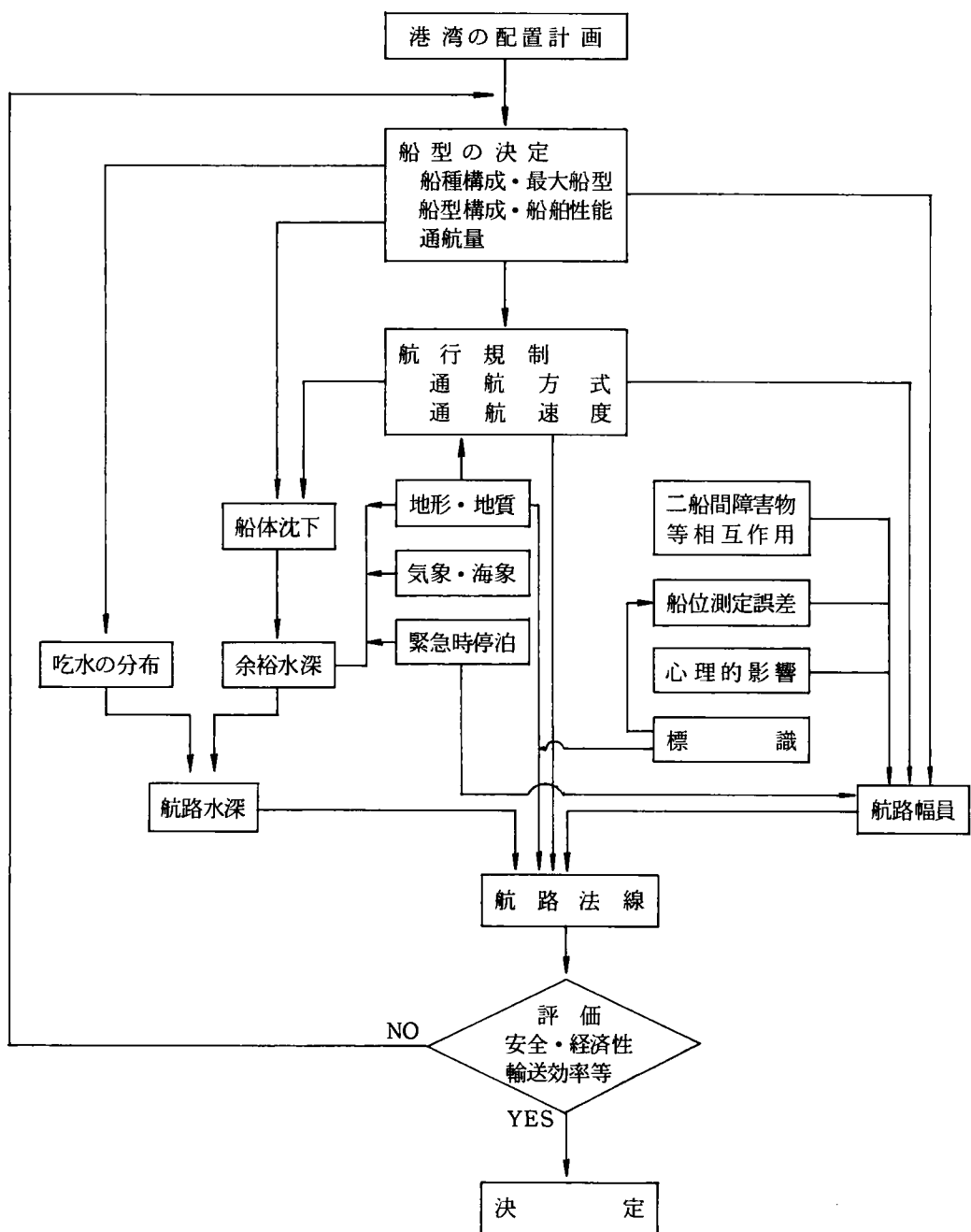


図 5 - 3 栗栖<sup>19)</sup>による航路計画の手順

ている。ここに規定されている航路諸元は、航路の法線、航路の幅員、航路の水深の3つである。以下では、まず技術上の基準に記述されている航路諸元の標準値ないしは設定法と、PIANCによる大型タンカー航行航路に対する勧告<sup>20)</sup>を紹介し、これ以外の検討結果についても概観する。

#### (1) 航路の法線

##### a) 技術上の基準

ここで示されているのは航路屈曲部の法線の形状である。屈曲部における航路中心線の交角は、概ね $30^{\circ}$ を越えないことが望ましいとし、 $30^{\circ}$ を越える場合には、対象船舶の船舶長に応じて曲率半径と航路幅員を一定の値以上とすることとしている。航路法線を決定する際には、入出港船舶の航跡の調査や海事関係者の意見を聴取するとともに、航路標識の整備状況、航行管制の施行の状況、航路分離の方法などを考慮する必要があるとされている。しかし、その具体的な考慮の方法について規定されているわけではなく、個々の事例ごとに適宜検討されているのが実状のようである。ここで、入出港船舶の航跡の調査と海事関係者からの意見の聴取を行うのは、その結果から標準的な操船方法を抽出し、得られた操船方法の下で無理のない航行がまず可能であるような法線設定を行うためと理解される。また、海事関係者からの意見の聴取は、同時に航行時の安全性を定性的にではあるが検討するための基礎情報を収集することをも意味している。

##### b) PIANCによる勧告

航路は可能な限り直線状に配置し、それが不可能な場合、特に考慮に入れるべき風や流れがなければ、船舶の長さの5倍以上の曲率半径を有するカーブで直線部分を結合するような形状が望ましいとしている。水深や海底の状態、幾何学的特性等によっていくつかの配置の中から選択する場合には、航行援助施設や固定物、現行制度等を考慮に入れた選択を行うべきであり、風による漂流量と航行速度のなす角の  $\tan$ gent は  $0.25$  を越えないことが望ましいとしている。

##### c) 操船シミュレータによる検討

航路は他の交通施設と同様、さまざまな計画代替案を実際に設置し、しかる後に検討を加えるということができない。また、既往の計画の中にはどれ一つとして同一形状の航路もない。そこで、所与の航行環境の下での船舶の運動を模擬し、操船者が当該航行環境における操船を体験しうる操船シミュレータが開発されてきている。この種のシミュレータを用いて異なった航路法線を有するいくつかの代替的な航路を航行する状況を模擬し、その良否ならびに問題点を検討することがある程度可能となってきた。ただし、本シミュレータによる検討結果は、操船者の主観的評価の形で与えられるために定量化し難く、臨場感の再現力の大小によっても左右されることがある。また、検討にはある程度長い時間を要するため、検討すべき代替案がかなり絞り込まれた段階で用いられる場合が多い。

## (2) 航路の幅員

### a) 技術上の基準

技術上の基準を定める省令<sup>21)</sup>は、航路幅員を、対象船舶の長さ以上（船舶が行き合う可能性のある航路）、ないしは対象船舶の長さの2分の1以上（船舶が行き合う可能性のない航路）の適切な幅とすると定めている。技術上の基準・同解説<sup>9)</sup>では、さらに表5-3に示す幅員を標準的な値としている。

表5-3 技術上の基準<sup>9)</sup>による航路の幅員

航路の長さ	通行の状況	幅員
比較的距離が長い航路	対象船舶どうしがひんぱんに行きあう場合	2 L
	上記以外の場合	1.5 L
上記以外の航路	対象船舶どうしがひんぱんに行きあう場合	1.5 L
	上記以外の場合	L

(Lは対象船舶の船長)

### b) PIANCによる勧告

公称水深を有する水域の最小幅を航路の幅員とし、一方向航路についてはこれを、①航路上を航行する船舶の位置決定誤差、②偏位認識後に航行位置を修正するための航跡の横距、③流れによる漂流距離、④船体の半幅、⑤船体の半幅以上の側方余裕、の和として設定するとしている。同時に航路幅員は航行船舶の船幅の5倍以上とするよう勧告しており、ブイによる航路表示を行う場合にはブイの振れ回り量をも考慮に入れるべく指摘している。さらに、屈曲部では $L^2/8R$ で与えられる幅員と側方余裕を操船の困難さに対処するため付加すべきであると述べている。しかしながら、二方向航路については幅員を決定するための研究の開始を勧告するに留まっている。

### c) 西日本港湾運航技術研究会の方法<sup>22)</sup>

対象とする船舶の挙動を決定論的に検討する方法の1つであり、他に同様のアプローチをとるものとして豊田の方法<sup>23)</sup>、飯島・本田の方法<sup>24)</sup>がある。基本的な考え方は、必要航路幅員が、針路を補正しながら航行する際に生ずる偏位量と他船ないしは陸岸に対して水力学的に必要なとされる距離との和からなるとするものである。

### d) 井上の方法<sup>25)</sup>

多数の航路における航跡の観測データを統計的に解析することによって、2-6-2で紹介した航行位置の分布を与える観測式に整理し、これを基に航跡が航路の外側へはみ出す確率が一定値以下となるように航路幅を設定するという方法である。

### e) Oldenkampの方法<sup>26)</sup>

d)で用いた観測データの代わりに操船シミュレータを用いて多数の航跡データを作成・解析する

ことにより、蛇行する航跡の極値の分布を求め、これが航路幅員の2分の1を越えないという考え方をとることによって必要とする航路幅員を求める方法である。

f) 黒田ほかの方法<sup>27)</sup>

乗り揚げ事故の発生確率を、危険ゾーンへの侵入確率と危険ゾーンからの脱出失敗確率の積と考え、前者を航跡の確率過程への当てはめから、後者を事故確率の実績データから求めることにより両者の積が所定の許容水準を越えないように航路幅員を設定するという方法である。

(3) 航路の水深

a) 技術上の基準

泊地の水深の規定による水深を確保するとともに、状況に応じて、底質、船舶の動揺、船体沈下等に対する余裕をさらに加えた深さを「適切な深さ」としているが、具体的な規定は見られない。

b) PIANCによる勧告

航路の浚渫水深は、計画最大船型の喫水に、①海水の塩分濃度や積荷の積載状態等に対する修正量、②スコットや操船条件などに対する余裕、③浚渫の際の誤差や測深誤差、を加えて決定する。ここに、①の修正量は0.3m以上とすることが望ましく、また、②の余裕は底質が砂である場合は0.5m以上、底質が岩である場合は1m以上確保するように設定する。さらに、航路水深に対する掘削斜面高さの比が0.4を越える場合には浅水影響を考慮すべきであるとしている。

c) 日本海難防止協会の方法<sup>28)</sup>

静止時における喫水に、①航走中の船体沈下量、②海図の水深誤差、③気象・海象等の環境条件、④安全余裕、を加えたものが必要とされる航路水深であるとして求める方法である。

5-3-3 従来の方法論に対する若干の議論

本節冒頭でも述べたように、航路計画の全体的な方法論を体系的に整理したものはほとんどないと言ってよい。また、先に紹介した数少ない方法論も5-2で述べた航路計画の目的や評価のあり方などに照らしてみるといくつかの問題点を有している。

第1の問題点として、これまでのものの多くは航路計画の前提条件と構成要素の関連を示しているに留まり、検討を進めて行くための手順とは異なるものであることを、まず指摘しなければならない。その理由の1つは、独立に設定されるべき計画変数と前提条件との区別が明確でないことにある。例えば、図5-3では航行規制の内容が対象船型によって規定され、さらに航路水深や航路幅員の設定が航行規制に依存するかのように表現されている。もちろん航路幅員という計画変数を設定する際に航行規制という他の計画変数にも考慮を払って調和のとれたものとすることは必要であるが、だからといって航路幅員が航行規制に一方的に依存するわけではない。逆に、航路幅員は望ましい交通流を実現させる上で航行規制のあり方に影響を及ぼすが、これもまた一方的に規定するようなものではない。すなわち、



複数の計画変数がある場合、それぞれの計画変数の変更が実現する交通流の状態に及ぼす影響は相互に密接な関連を持つことが多いが、そのような場合であっても計画変数の設定は基本的に独立になされるべきであり、他の計画変数との関連でその設定が適切であったか否かは実現した交通流の姿からのみ判断されるべきなのである。したがって、評価の結果、実現する交通流の姿をさらに望ましいものとするために計画変数を変更するためのフィードバック・ループが必要となる。

いまひとつの理由は、検討の各段階で得られる情報が、次の段階における検討の内容、さらには全体的な評価の作業とどのような関連を有しているかが明確でないことにある。いかに作業の手順が流れ図などの形で整理されていても、各段階における作業の目的（どのような結果をどのような形式で求めるか）が明らかにされず、段階を経るにつれて蓄積されてゆく一連の結果が計画案の選定にどのように貢献するかが明示的に示されていないようでは、それに沿って検討を進めることが困難となり、そのつど適切な方法を編み出すことを強いられることとなろう。この意味で、5-3-1に示した方法論は、単なる計画要素間の関連図の域を出るものではない。

第2の問題点は、比較・検討すべきいくつかの計画代替案を実施した場合、それぞれ計画の目的をどの程度達成することになるのかということに関する定量化が十分ではないことである。例えば、航路幅員と航行安全性に問題を絞ってみても、従来の方法は「航行安全性の面から必要とされる航路幅員」あるいは「安全な航路幅員」という表現の下に推奨される航路幅員を算定するものであって、算定された航路幅をいま少し広くあるいは狭くすることによって航行安全性がどのように変化するかを定量的に教えるものではなかった。

第3の問題点として、航路に求められる安全性や迅速性といった諸機能が当該代替案を選択することによりどの程度発揮されるかということに対する定量化が互いに比較できる形ではなされていないことが挙げられる。迅速性を犠牲にすることにより安全性を向上させることができ、逆に迅速性を向上させるためには若干の安全性の低下が避けられないといったように、航路の機能は互いにトレード・オフの関係を構成していることが多い。したがって、それぞれの機能面から見た望ましきの程度が相互に比較できる形で定量化されていないことには、上述のトレード・オフの解決を図り得ない。

第4の問題点として、施設提供者（計画主体）と利用者といった異なる評価主体間に構成されるトレード・オフ問題を解決するための検討を定量的に成し得るものでなかったため、選ばれる代替案が評価主体に関する全体的な最適性の裏付けに欠けるという点が指摘できる。「要請するものの立場で行動の指標が異なる<sup>29)</sup>」ことは、一般に複数の評価主体が存在する公共事業で念頭に置いておくべき基本的な事項であり、航路計画とて例外ではない。また、交通施設の経済容量設定に関して著者<sup>30)</sup>が指摘したと同様に、航路計画も、交通施設としての航路と、そこを利用する船舶交通流との相対的バランスといった観点から代替案選択がなされなければならない。従来の方法は、このような観点から航路計画を検

討しうものではないと言わざるをえない。

以上は、主として計画を評価する観点からの問題点であったが、第5の問題点は対象とする船舶交通の取り扱い方に関するものである。航路諸元を決める際に、従来の方法は、対象とする船型の船舶が単独航行する場合、あるいはたかだか1隻の他船と行き合う状況のみを想定し、このような状況の下で安全に航行できる航路諸元を、主として個々の船舶の微視的な船体運動の観点から検討して決定するものであった。これは、個々の計画変数についても許容範囲についての下限、すなわち最低限確保すべき物理的な航路諸元を規定するものに過ぎない。もちろん、交通が輻輳している航路にあっては付加的に余裕を確保することとされているが、余裕量の適切さについての根拠に乏しいきらいがあり、何よりも、「何をもって適切とするか」という議論に欠ける場合が多いように見うけられる。余裕を必要とする1つの大きな理由は、航路上での輻輳が顕著となった場合にも対応が可能となるためであるが、航路上での交通輻輳が日常的となった今日では、計画の対象とすべき船舶交通を記述するにあたり、輻輳の状況を明示的に取り入れてしかるべきではないかと考える。

最後に、5-2-2で示したように、本研究では、航路計画の中には航路施設計画のみでなく航路利用・管理計画まで包含すべきであると考えている。したがって、航行規制の変更などを航路幅員や航路法線の変更などと同列に比較・検討する方法が示されねばならない。従来の方法論にも「航行規制」や「管制・標識」という語句は見られるが、検討作業に具体的にどのように取り入れられるかが明確に示されているとは言えない。

## 5-4 本研究で提案する航路計画の考え方

### 5-4-1 航路の機能が発揮されている度合を定量的に考慮した航路計画

交通施設が具備すべき条件として、迅速性、経済性、確実性、快適性、利便性、安全性の6つがある。以上の6条件はいずれも計画策定時に考慮を払わなければならないものであるが、5-2-1でも述べたように、航路においてはとりわけ航行安全性と迅速性の確保が重要となる。

交通事故的<sup>31)</sup>海難の多くは人為的ミス<sup>31)</sup>を原因とするものであるが、かりに主因が操船者のミスであるとしても、操船者をとりまく航行環境（航路特性、交通特性、自然条件など）が事故の誘因となっていることが少なくない。福島<sup>31)</sup>は、海技免状を持たない甲板員に見張りや操舵をまかせて瀬戸内海を航行していた旅客船が、航路筋にあった暗礁に乗り揚げ、船底を大破、沈没して多数の死傷者を出すに至った海難の例を引いて、海難審判などにおける結末が運航責任者の責任を追求したにとどまって「もし暗礁の上に燈台があったならば、この海難は発生しなかったであろう」という航行環境面からの判断がなされなかったこと、その後、その暗礁の上に燈台が設置されたところ類似の海難が発生しなくなったことを示し、真の海難防止対策を追求するためには、発生した海難とその環境条件との因果関係まで掘り下

げて検討することが重要であることを指摘している。また、海域によって事故発生率が異なる事実は安全な航路と危険な航路があることを示唆するものであり、個々の航路が有する航行環境が交通事故的航海の発生に大きな影響を及ぼしていることがわかる。そこで、航行環境に存在する事故の誘因を明らかにし、これを排除することによって人為的ミスの発生を減少させるシステム、あるいは、ミスが生じたとしても初期のうちにこれをカバーし、事故に結びつきにくい安全度の高いシステムの構築を計ることが要請される。しかしながら航路の航行安全性を定量的に規定する尺度が確立されていなかったこともあって、個々の航路がどの程度の高さの安全度を有するかは十分明らかではなかった。

航路における船舶の航行安全性と航行環境との関連性を取り扱った研究は3-3で示したように、これまでも数多く見受けられる。これらの研究成果により、航路上の衝突確率に関する情報はかなり豊富に得られるようになってきた。しかしながら、モデルに組み込まれた説明変数やモデル自体の操作性の面から、航路設計代替案の詳細な検討には必ずしも適したものといえず、あくまでも衝突危険度を推定する段階にのみ留まっていた。一方、木俣・石崎<sup>32)</sup>やVaganov<sup>33)</sup>などの航路設計の方法を論じた研究も航行安全性の取り扱いなどの点で必ずしも上述の研究と整合するものでなく、航行安全性を考慮した形で航路の設計・計画をシステムティックに行う方法論は見られなかった。さらに、航行安全性を高める施策は、一般に一つに限らず複数のものが存在するが、それぞれの施策の実施が航行安全性の向上に及ぼす相乗的効果が定量化されていなかったため、最も適切な方策（単独またはそれらの組み合わせとしての）を選定することの根拠に欠ける面もあった。第3章で提示したOSHICOPモデルは、上述のような背景の下に、航路計画の安全性の面からの評価を可能とするために、計画諸変数と衝突事故率を関連づける道具として開発された。

一方、航路が有するもう一つの主たる機能である航行の迅速性についてもこれを定量的に推定する研究やモデル開発が進められ、どのような計画代替案の下でどの程度の迅速性機能が発揮されるかをある程度容易に知ることができるようになってきている。

これらのモデルを用いて種々の検討を行った結果、次章以降で示すように航路整備や航行規制が衝突事故確率と遅延時間の減少にかなり有効に働くことも明らかとなってきた。このような状況を踏まえて、本研究では、航路の機能が発揮されているその度合を定量化することにより、これを最も効率よく高めるという評価基準の下で、望ましい方策（計画代替案）を選定する合理的な設計原理を提示しようとするものである。

#### 5-4-2 航路計画の望ましさに対する総合的な評価

従来の航路計画の主たる内容は、航路上を同時に航行する船舶がたかだか2隻でしかないような状況下で、微視的な船体運動の面から規定される航路諸元の設定にあった。したがって、航行の迅速性や他船舶との頻繁な遭遇により操船者が過度の緊張を強いられないという意味での快適性については、積極的

に考慮されることもなかった。これは、航路上における交通の輻輳を前提としていなかったためである。しかしながら、航路上での交通輻輳が恒常的なものとなっている現状では、交通の輻輳を考慮しておくことが重要となる。そこで、本研究では、従来の方法で求められる航路諸元の値を最低許容基準とみなし、これに適当な余裕量を付加したものを航路諸元の計画値とする。そして、前者は従来の方法に従って設定し、後者は計画の目的と考慮すべき種々の制約条件に照らして総合的な評価を下し決定する。この余裕量は交通の輻輳に対処するためのものであって、安全性のみならず前述の迅速性や快適性などの観点からも検討されるべきものである。しかるに、航路が有すべきこれらの諸機能は互いにトレード・オフの関係を構成している場合があるため、これらを総合的に評価し、航路計画の全体としての望ましさをいかに高めるものであるかが検討されなければならない。

一方、航路計画にはさまざまな評価主体が存在し、それぞれの立場から見た航路の望ましさに関する評価は相反する場合がある。そこで、それぞれの評価主体ごとの評価を行った後に、全ての評価主体から見た航路計画の総合的な望ましさについても検討されなければならない。本研究では、総合的な評価基準として国民経済的観点に立った効率性基準を採用する。ここに、計画代替案の選択を国民経済的観点に基づく評価方法に載せることは、施設提供者や航路利用者といった航路計画に関係する各評価主体それぞれの評価の全てを明示的に考慮しうることを意味している。そして、同一の投資の下で対象航路の全体としての機能を最もよく高められる計画代替案（あるいは、逆に、対象航路の機能を一定水準だけ高めるための投資が最も少なくてすむ計画代替案）が最も望ましい代替案であるとする考え方をとる。ただし、この方法（Risk-Cost-Benefit Analysis）は航路計画の望ましさを投資の効率性の観点からのみ論じようとするものであって、便益・費用の帰属とその公平性については何も言わないため、公平性については別途検討し、調整を図る必要がある。

#### 5-4-3 リスクが存在するシステムの分析と計画

上に述べた航路計画の方法論のうち、航行安全性に関する検討を行なうに際して、航路を、そこを利用する船舶をも含めて、危険（リスク）が存在する1つのシステムと捉え、リスク・アセスメントの考え方に沿って方法論の構築を進める。計画者は与えられた条件のもとで、最も適切かつ実現可能なシステムを設計する必要に迫られるが、リスク・アセスメントの考え方に基づいてリスク分析を実施することは根本的かつ系統的な航行安全対策の発見を容易にし、安全面のバランスという観点から適切な代替案を選択する助けとなるため、極めて高い有効性を有すると考えられる。

リスク・アセスメントは、通常、

- ① 準備作業としての「システム同定」
- ② 「リスクの同定」と「リスクの見積もり」の両者からなる「リスクの決定」
- ③ 「リスクの評価」

#### ④ 「システムの変更」

といった要素から構成され、通常この順序に沿って実施される。<sup>84)</sup>「リスクの同定」はシステムにどのようなリスクが存在しているかを明らかにするプロセスであり、「リスクの見積もり」は同定されたリスクがどのような対象にどの程度の規模と損害をどの程度の頻度でもたらすかを定量的に求めるプロセスである。また「リスクの評価」は、明らかにされたリスクを社会ないし個人がいかに受け入れ、あるいはリスク軽減策の必要を感じるかを明らかにするプロセスである。これを航路計画の例で言い換えると、「リスクの同定」は、船舶航行リスクとは具体的に何を意味するのか、それはどのような事象の発生からいかなる形をとってもたらされるかを明らかにすることに相当する。「リスクの見積もり」は、航行リスク、例えば、船舶相互の衝突が生ずる確率とその衝突がもたらす損害の規模を、航路形状や交通の状態といった航行環境と定量的に関連づける作業を意味する。これには、逆に、航行環境を変えた場合に变化するリスクの程度を見積もる作業が含まれることは言うまでもない。ここで定量化されたリスクは、次いで評価に適した尺度へと変換され、他の評価項目とも合わせて「リスクの評価」へと送られる。ここでは、航路上を航行することによるリスクがどの程度まで社会的に許容されるかを明らかにするとともに、一定の評価方法と評価基準の下で、考えうる航路計画代替案を比較し選択する作業を指す。評価方法とそこにおける評価基準は、リスクの性質や計画の目的に照らして個々の計画に即したものを設定することが必要である。この結果明らかにされたリスクレベルが許容されず、かつ、システムを操作することによってリスクの大きさがコントロールできる場合、許容しうるレベルあるいは最も望ましいレベルにまでリスクをコントロールしようとシステムの変更がなされる。

以上より、リスク・アセスメントは、いくばくかのリスクが存在するシステムを計画・設計する際の一つのシステムティックなアプローチであることがわかる。そこで、本研究では、航路計画策定の方法論を、リスク・アセスメントの1つの適用とみて論じることとする。

なお、「船舶航行リスクの同定」は、船会社及び損害保険会社などにおいてかねてより行われているが、それぞれの立場におけるリスク分析の目的に応じた同定がなされているため、航路計画のために同定されるものとはもとより異なる。「リスクの見積もり」については、既に海上交通工学の分野で、航行環境とリスクの生起確率のかなり詳細な関連づけが進められているが、リスクがもたらす損害の定量化はまだ端緒についたばかりであるため、「リスクの評価」にまでは至っていないのが現状である。

#### 5-4-4 計画対象交通流の概念

海上における船舶の衝突を予防し、もって船舶交通の安全を図ることを目的として制定された現行の海上衝突予防法は、主として1隻の船舶が他の1隻の船舶と遭遇する際の航法を規定したものであり、複数の船舶と同時に遭遇する場合（多重遭遇と呼ばれる）の航法を明確に示すものではない。第3章の図3-7に船舶Aが右方から接近する船舶Bと左方から接近する船舶Cに遭遇している状況の例を模式

的に示したが、Aは、Bに対して避航すると同時にCに対しては針路と速度を保持しなければならないという困難に陥っている。このような場合には臨機応変の処置をとることとされているが、極めて危険な状況であることが容易に理解される。困難な状況の下にあっても適切な判断によってこれを切り抜けるよう操船者の技術を高めることも一つの方策ではあるが、このような危険な事態は本来起こるべきではなく、まず適切な航路計画を策定・実施することによってその解消を図るべきであると著者は考える。そのため、交通の輻輳している航路を計画する場合、航路上を同時に複数の船舶が航行している状態を念頭に置いておくことが重要となる。

ところで先に述べた危険な事態がどの程度の頻度で生じるか、あるいはそれがどのような状況となるかは、航路を航行する交通流全体の特性に依存する。したがって航路計画に際しては、後に述べるような交通流全体の挙動を記述する要素を明示的に取り扱うことが望ましい。

従来、航路計画において航路諸元を決定する基礎は「計画対象船舶」に置かれていた。計画対象船舶は多くの場合当該航路を通航することが予想される最大船型の船舶とされる。前節で説明したように、航路幅や航路水深は、基本的にこの計画対象船舶の船舶長や喫水に基づく値とし、必要に応じて余裕をとるものとして決定されてきた。しかしながら交通の輻輳を考えた場合、「計画対象船舶」は交通流の特徴を記述するための一要素でしかない。そこで、本研究では交通の輻輳している航路の計画を策定する際に考慮すべき交通特性を抽出するとともに、計画で想定するこれらの諸特性の具体的な値によって規定される交通流を「計画対象交通流」と名付け、これをもって航路計画策定の基本概念とすることを提案する。“流れ”を安全かつ円滑に流すためのもう一つの計画分野である河川計画においても、当初は計画最大流量が個々の計画地点における計画の基本量とされていたが、瞬間値としての計画最大流量は流れの一側面を記述するものでしかないため、これに時間的な変化の様子を導入した計画高水（ハイドログラフ）がその後の計画の基本量とされた経緯に類似点が見られる。<sup>35), 36)</sup>

さて、計画対象交通流を記述するために必要かつ十分な指標を何にとるかにについては今後議論を重ねる必要があるが、基本的には、

- ① 船舶の大きさを記述するもの
- ② 船舶の運動特性を記述するもの
- ③ 交通量を記述するもの

の3つに分類されよう。

このうち、船舶の大きさについては船型構成分布を規定するパラメータとなる対数船舶長の平均と分散、およびこれまで用いられてきた最大船型が最も重要な指標となる。

交通量については、日平均交通量やピーク率に代わって、一日の時間交通量の変動を記述する時間—交通量曲線のようなもので与えられることが望ましい。また日交通量は年間を通じて変動するものである

ため、その設定にあたっては適切な順位のものが選ば  
る必要がある。(日本海難防止協会<sup>87)</sup>によると10番目日交  
通量を境に日交通量の変化に異なる傾向が見受けられ  
るため、10番目日交通量が計画日交通量として適当であ  
るとも考えられるが、さらに検討を要する)。さらに、港  
湾前面に位置する航路では時間帯により一方向の交通量

のみが卓越する傾向が顕著であるため、方向別交通量比の時間変化も指標として重要である。

一方、船舶の運動特性としての速度分布や航行位置分布、到着時間間隔分布などは、第2章に示した  
ように、船型や交通量と関連づけられているため、特に指標とする必要はないと考えられる。

以上の検討より、計画対象交通流は、当面、表5-4に示す指標により記述すればよいと思われる。

なお、先に述べた河川計画の分野では、既往の実績や流域の重要度、および流域の流出特性などから  
計画高水を設定する方法論が確立されている。本研究の範囲を越えるためここでは論じないが、航路計  
画においても各港湾の入出港船舶に関する将来推計値や航路と港湾の位置関係、あるいは当該航路の重  
要度などに基づいて計画対象交通流を設定する方法論の確立が望まれるところである。

#### 5-4-5 航行規制を考慮にいたした航路計画

港湾計画には、港湾施設計画と港湾管理利用計画が含まれる。このうち後者は、前者に基づいて整備  
された港湾施設が機能を十分に発揮しうるように管理・利用の方法を規定する。これからもわかるよう  
に、一般に、施設計画の評価はその利用の仕方いかんによって大きく変わる。したがって、施設計画は  
その利用に関する計画と一体的に策定されてはじめて十分な機能が発揮される性格のものであると考え  
られる。航路計画にあっても航路形状に代表される施設面の計画と、航行規制に代表されるようなそこ  
を利用する船舶の航行方法に関する計画が一体的に策定されてしかるべきであって、以下では前者を航  
路施設計画、後者を航路管理・利用計画（簡単のため航路利用計画、以下同じ）と呼ぶこととする。

航路計画は、これまで航路施設計画を主たる内容とし、航路利用計画は必要に応じて別途策定されて  
きた感があるが、これは主管官庁が異なることに加えて両者の関連が十分把握されていなかったことに  
も起因していると思われる。しかしながら、次章で示すように、両者は航行安全の面でとりわけ密接な  
関連をみせる。それゆえ、今後航路における輻輳が一層顕著となった場合や、より高い航行安全性が要  
請されるような場合に、航路施設計画のみによって十分な対応が困難となるようであれば、一定の航行  
規制の実施を前提とした航路施設計画をたてることも有用となろう。(例えば、現在海上交通安全法によ  
って最大速力が制限されている航路区間を改修するような場合を想定されたい)。

航路施設計画と航路利用計画の両者が航行安全性に与える効果は衝突確率の変化をもって統一的に定  
量化することができ、迅速性に及ぼす影響も航行シミュレーション・モデルを用いることによって共に

表5-4 計画対象交通流を記述する指標

- |                  |
|------------------|
| (1) 平均対数船舶長      |
| (2) 対数船舶長標準偏差    |
| (3) 最大船型         |
| (4) 時間交通量の時刻推移   |
| (5) 方向別交通量比の時刻推移 |

推定することが可能である。

以上のような背景から、本研究では、航路施設計画と航路利用計画の双方をもって航路計画の内容とすべきであると考えている。

## 5-5 航路計画の方法論に関する基本的枠組み

先に述べたように、航行安全性の向上という観点から見た航路計画は、リスク・アセスメントのひとつの適用例と見なすことができる。このような観点から本研究で論じる航路計画を1つのシステムと捉え、これを構成するサブシステム相互の関連を一部リスク・アセスメントの手順と対応づけて整理することによって、図5-4に示す航路計画の方法論に関する基本的枠組みを得ることができる。この基本的枠組みは、次章以降の検討結果を受けて、第9章で“航路計画の検討手順”としてとりまとめられる。以下、順を追って説明を加える。

### 5-5-1 システム同定 (System Identification)

まず、対象とする航路を、その上を航行する船舶交通流をも含めて明らかにすることから作業は始められる。これを航路システムと呼ぶこととすると、それを特徴づける要素は、航路特性、交通特性、船舶特性、操船者特性、自然条件、ならびに航路周辺環境条件に大別される。また、事故による被害の拡大を未然に防止するための各種の対策も要素となりうる(5-2-3参照)。このうち、交通特性については、5-4-4で述べたように、従来検討対象となっていた最大船型や最大喫水だけでなく、通行船舶の船型構成や交通量といった対象交通流全体の特性を明らかにしておくことが重要である。これらの要素には操作可能なものと不可能なものがある。航路整備や航行規制を実施することにより操作することが可能な要素の全てが検討の対象となり、そうでない要素は計画の前提条件ないしは設計条件として取り扱われることとなる。本研究では簡単のため、以下航路幅のみを計画における操作変数として取り扱うが、他の操作可能な変数についてもこれと同様の方法で検討することが可能であることは言うまでもない。

### 5-5-2 リスクの同定システム (Risk Identification System)

#### (1) リスクの定義

次に、明らかにされた航路システムと検討対象となるリスクとの関連づけを行う「リスク決定システム」に進む。先にも述べたように、本システムは、航路システムにどのようなリスクが存在するのかを列挙すると共にその性格を明らかにし、計画策定時に考慮すべき重要なリスクを抽出する「リスクの同定」、および、原因となる航路システム構成要素と結果として生じるリスクとの関係を定量化する「リスクの推定」の両者からなる。本サブシステムは、リスク・アセスメントの一連の作業のなかでも基幹となる部分であるが、内容の説明に入る前に、“リスク”という語そのものの概念に関して少し整理しておこう。



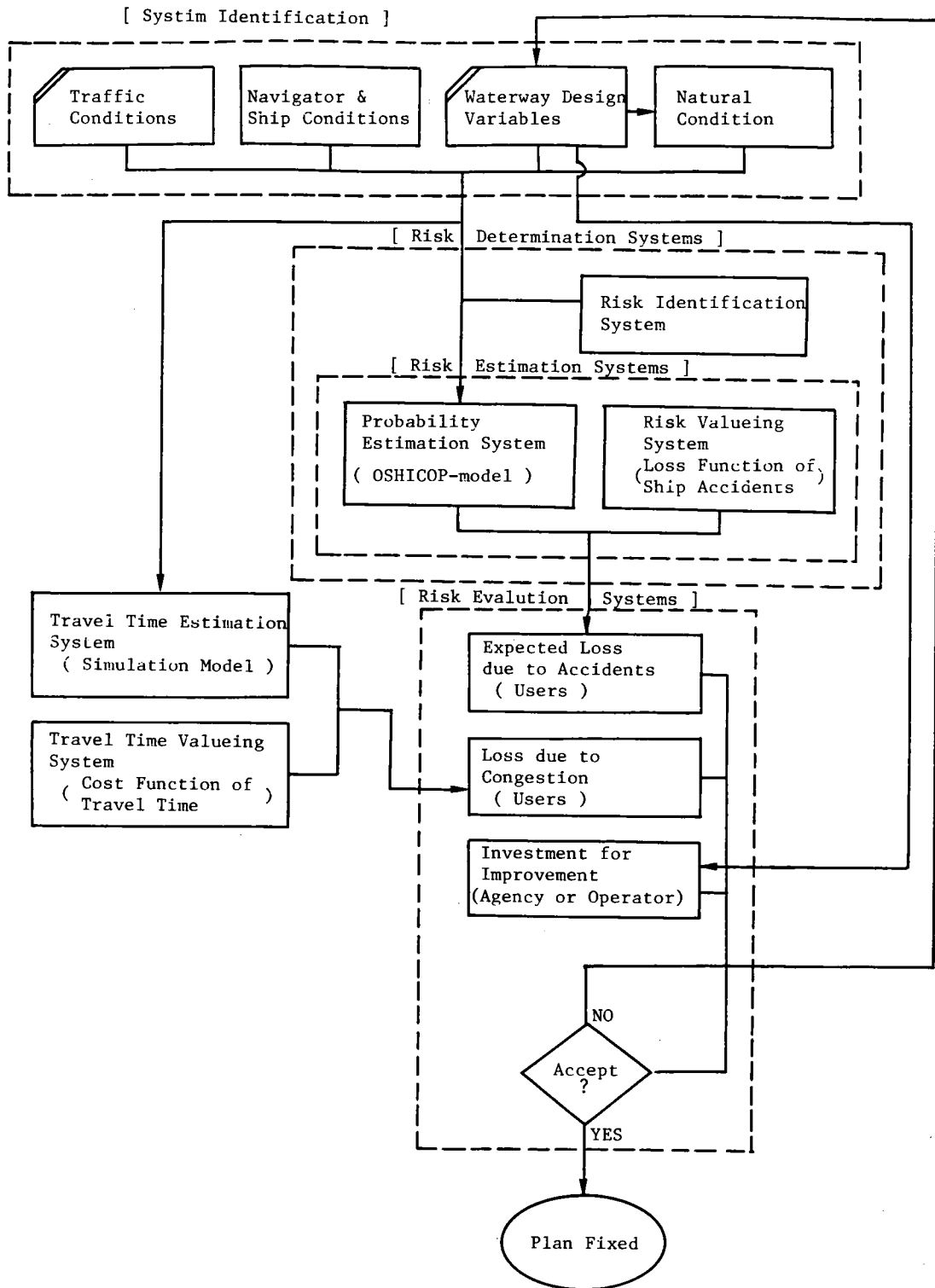


図 5 - 4 航路計画の基本的枠組み

リスクには、以下のごとく様々な定義が与えられている。

- (i) 望ましくない出来事の発生に関する不確実性の客観的側面 (A. H. Willet<sup>38)</sup>)
- (ii) 測定可能な不確実性 (F. H. Knight<sup>39)</sup>)
- (iii) 危険状態 (ハザード) の結合であり確率によって測定される (I. Pfeffer<sup>40)</sup>)
- (iv) ある所与の状況において一定期間中に起こりうる結果の変動 (C. A. Williams<sup>41)</sup>)
- (v) 望ましくない負の結果の実現の可能性 (W. D. Rowe<sup>42)</sup>)
- (vi) 事故事象が生起する確率とそれがもたらす結果の組み合わせ (A. E. Green<sup>43)</sup>)

以上を言い換えると次の4つにまとめられる。

- ① 生起が不確定な望ましくない事象
- ② 望ましくない事象の生起確率
- ③ ①がもたらす損害を対策の努力と比較するため、①の事象を金額等で定量的に見積もったもの
- ④ ②と③を組み合わせ、期待損害額等で定量的に見積もったもの

①は死亡、航路の閉塞などが生ずることを言うが、これは、いろいろな事故(accidentあるいはhazard)の発生に伴う。②の場合は①の事象の発生する頻度、確率を意味する。これは、起こる事故の頻度、確率と関係する。事象の種類別、規模別等に分類して確率表示することが有用である。③の場合は、損害が小さければ大きな投資を要する対策を行っても効率的ではなく、多くの場合、払われる努力は貨幣価値で示されるので、これと比較するためである。④は、総合的に見たリスクが大きいものに着目して、それに対して重点的に対策を行うことが有効であるため、期待値として取り扱おうとするものである。

本研究では、リスクの軽減を目指した代替案選択の基礎とすることが目的であるため、④の意味をもってリスクの定義と考えることとする。

## (2) 航路計画におけるリスクの同定

さて、以上の議論に基づき、航路計画で検討すべきリスクを同定しよう。

保険証券の約款に示される「海上危険 (marine risk)」とは、表5-5に示す内訳をもつ概念である<sup>44)</sup>。本研究で対象とすべきリスクは(1)で示した④の意味で用いるため、「生起確率が小さい」あるいは「及ぼす損害が軽微である」といった条件を有し、これがために期待損害の大きさが小さいものは対象として適切ではないこととなる。また、本研究は航路計画の代替案選択に用いることを目的とする解析であるため、航路の整備や航行方式の変更により軽減することのできないものもやはり対象とはならない。更に、システムに内在するリスクが誰にとってのリスクであるかを分析しておくことも重要である。航路計画は一般に社会的基盤施設整備として公共事業により行われるプロジェクトの計画であるため、関連する全ての立場を考慮に入れておくことが要請されるが、そうでない場合には当該計画主体に

表 5－5 海上危険の内訳（東京海上火災保険<sup>44)</sup>より引用）

証券表面の危険約款の列举危険	その内容と具体例
海固有の危険（perils of the seas）	沈没、座礁、触礁、座州・衝突・荒天による各種損害（浸水、荷崩れ、波浚いなど）
火 災（fire）	焼失、加熱による変質、消火注水によるぬれ損
強 盗（thieves）	暴力または威嚇による強奪。ただし、窃盗（theft & pilferage）は含まない
投 荷（jettison）	共同海損行為の一種（船舶および積載貨物を危険から救うべく、貨物、船舶の貯蔵品の一部などを投棄して船足を軽くする措置）
船員の悪行（barratry of the master and mariners）	船主、用船者に損害を及ぼすような一切の不正行為

大きな損失を与えるもののみが検討の対象とすべきリスクとして同定されることもある。(図5－5に舵故障という原因事象がどのような形をとってどのような受け手に望ましくない事態をもたらすかを分析した例を示す)。このように考えると結局、表5－5に挙げられた海上危険のうち航路計画において検討対象とすべき「望ましくない事象」は衝突、乗り揚げといった交通事故的海難であることが明らかになる。この両者と並列して列举されることが多いこれ以外の事故、例えば機関故障や舵故障、油の流出などは、図5－5に例示したEvent Treeからも理解されるように、結果として衝突、乗り揚げをもたらすもの、あるいはこれらの結果としてもたらされるものと考えられるため、ここでは、分析すべき「望ましくない事象」とはしない。そして、全海難に占める衝突事故隻数の比率が60％（乗り揚げの約3倍である）にもよる事実を念頭に置き、本研究では以下、検討対象をまず衝突事故のみに絞って分析を進めることとする。

以上より、本研究では航路計画におけるリスクを、当該航路上を航行する船舶の衝突がもたらす期待損害額、すなわち衝突事故による損失と衝突事故発生確率との積とする。

### 5-5-3 危険発生確率の推定システム (Probability Estimation System)

先に示したリスクの定義（危険の発生確率とそれに伴う損失の積）から容易に理解されるように、リスクを小さくするためには2つのアプローチがある。1つは危険が発生する確率を小さくしようとするアプローチであり、事故の発生確率を小さくすることがこれに相当する。他の1つは、発生した危険がもたらす損害額を小さくすることによりリスクそのものを小さくしようとするアプローチで、流出油の拡散防止対策や救助体制の拡充などがこれに相当する。「リスクの推定システム (Risk Estimation System)」はこの両者に関して分析を加える機能を有するシステムであり、「発生確率推定システム (Probability Estimation System)」はその前半部分にあたる。ここでは、既往の事故データを統計

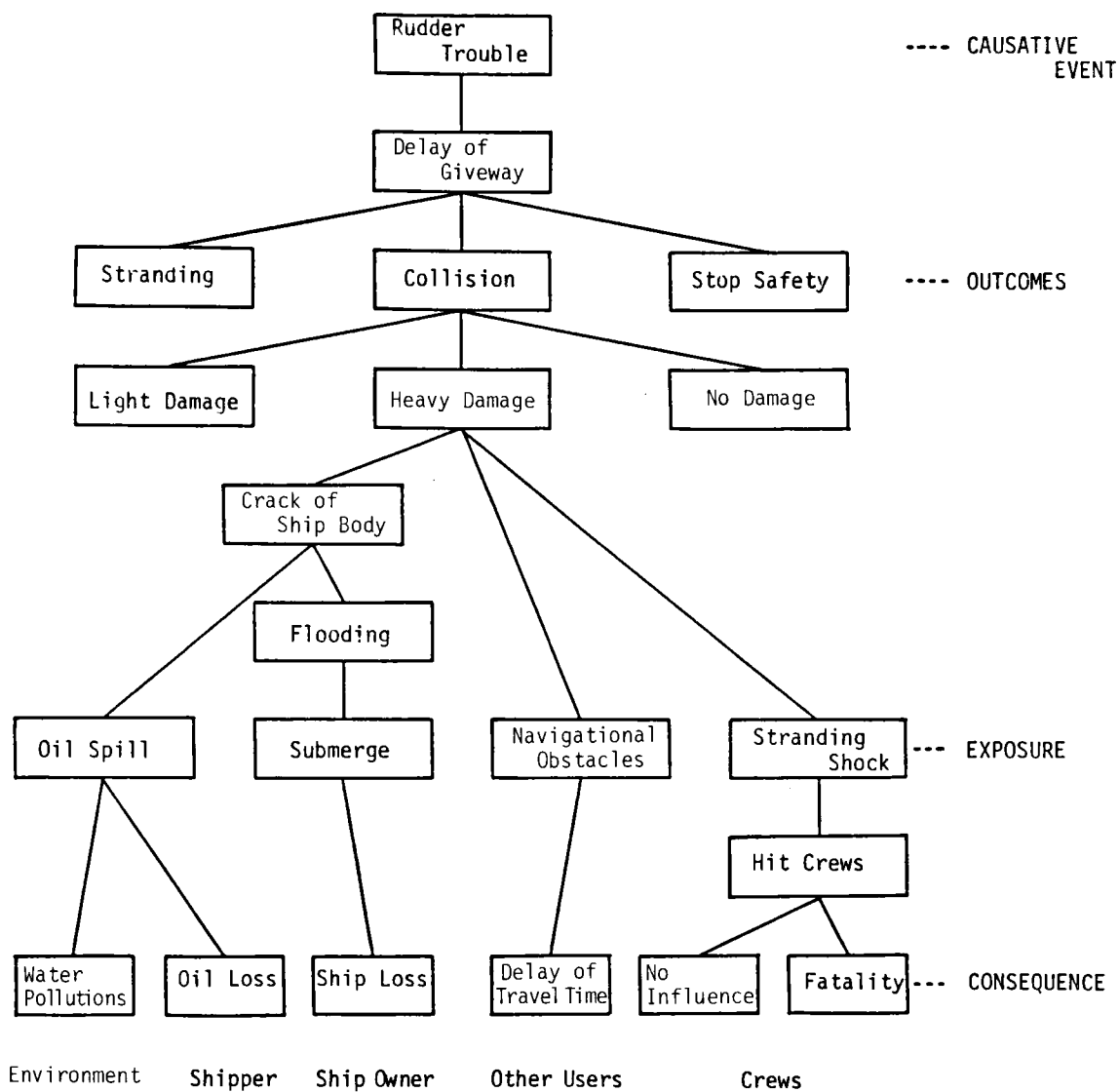


図5-5 舵故障のEvent Treeの例

的に解析したり、現象説明モデルを作成したりすることによって、システム構成要素と危険の発生確率を関連づけ、所与の条件の下で操作可能な要素を変更することにより危険の発生確率をどのようにコントロールしうるかを分析する。その際、多数の計画変数の様々な組合せの中から望ましい航路計画代替案を選び出すために用いる道具としての分析モデルは、検討すべき計画変数が組み込まれ、かつ詳細な検討が容易に行なえるよう操作性に富むものが求められる。

本研究では第3章で提案したOSHICOP-モデルを用いて、計画変数の種々の組合せの下での衝突確率を推定する。

#### 5-5-4 リスクの価値評価システム (Risk Valuing System)

「リスクの推定システム」の後半部をなす。ここでは発生する危険がもたらす損失の大きさが定量化される。その際、後に述べるように航路計画で対象とするリスクの性質と、航路計画の策定に用いるという目的から、リスクの大きさを期待損害額で表わしておくことが有用となる。したがって、損失の大きさは貨幣価値、すなわち損害額で測定される。本来、航路計画の計画変数には発生する事故の損害額に影響を及ぼすものも含まれていると考えられるが、本邦沿岸主要航路を見ても、損害額に影響を及ぼすほどの特筆すべき事項は見当たらないため、ここでは平均的な状況の下で発生した衝突事故の平均損害額を算定することにより、リスクの価値評価を行うこととする。

#### 5-5-5 航行時間推定システム (Travel Time Estimation System)

航行規則による船舶交通の整流化や航路の整備は航行安全性のみならず迅速性をも向上させる。このことは、航行安全性の向上だけを念頭においている場合に比べて航路計画を実施するための投資の可能性が広がることを意味する。そこで、本システムでは、迅速性の向上度を混雑の解消による航行時間（航路の通航に要する時間）の減少分で測定し、定量化する作業を行う。すなわち、航行時のリスクを推定する際に用いた衝突事故確率推定モデルと同様に、航路計画の計画変数と対象航路上での航行時間に関連づけ、計画変数の変更に伴う航行時間の変化の挙動を知ろうとする。本研究では第4章で検討した避航領域を組み入れることにより、この目的に即した現象説明力と操作性を有するシミュレーション・モデルを開発し、その結果に基づいて両者に関連づける実験式を作成することにより、航行時間を推定する。

#### 5-5-6 航行時間の価値推定システム (Travel Time Valuing System)

上記によって推定された遅延時間の変化分は、別途推定されるリスクないしは航路投資額とは異なる単位をもっているため、このままでは比較することが困難である。そのため、両者を共通の尺度に変換しておくことが要請される。本研究では、リスクが期待損害額で測定されることや、遅延も一種のリスクと考えられること、あるいは次に検討する評価基準などから時間を貨幣タームに変換して比較・評価することとする。

### 5-5-7 リスクの評価システム (Risk Evaluation System)

#### (1) リスクの性質

リスクを内包したシステムの計画代替案を評価する際、当該リスクの性質の違いにより、評価の方法が異なる場合がある。そのため航路計画におけるリスクの性質を明らかにしておくことが今後の取り扱い上、有用となる。

McCormic<sup>45)</sup>は、リスクの評価において、リスクそのものの性質が果たす役割の重要性を指摘し、リスク一般が有する代表的な性質を列挙している。このような観点から航路計画に関するリスクがどのような性質を持っているかを整理し、表5-6に示した。リスク自体の性質のうち、もたらされる結果は軽微なものから、重大なものまで様々であり、影響範囲も社会経済活動への波及までを考えると広範囲にわたる場合がある。また、影響の残存効果については、流出油による海洋汚染の影響がとりわけ顕著なものである。リスクを受ける人間の態度に関する性質のうち、リスクの存在の認識は、ほぼ全ての船舶が海上保険に加入している事実を考えると単にその存在を認識しているのみでなく、保険料の選択を通じて生起確率や損失の大きさまでかなり定量的な知識を有しているものと思われる。また、代替案の存在については、他のルートや輸送機関への転換が全く不可能というわけではないため、たとえ無意識的であるにせよ、当該航路を選択したものと見なすことができる。

#### (2) リスクの評価方法

次に、リスクを評価する際の評価基準について考察を加えよう。

一般にリスクの評価方法には次の4つがある。<sup>34)</sup>

##### ① バックグラウンド法

「自然環境で起きていること」や「明らかな影響なしに長期間許されてきたこと」のリスクと比較してどの程度大きなリスクであるかで評価するもの

##### ② バランス法

代替案の中でいくつかのリスクについて適切なバランス（合成リスクの最小化）が達成されたならば、あるリスクをそれ以上減らそうとするのは意味がないという原則に基づくもの

##### ③ 比較法

他のリスクと相互に比較することにより、当該リスクの重要性や受容性を測ろうとするもの

##### ④ リスク便益法

リスクとそれがもたらす便益とを比較し、その大小関係で評価しようとするもの。通常はリスクの大きさを貨幣価値に換算する事が多い。論拠は、便益が大きければ、大きなリスクも許容できるとするものであって費用便益理論の特別のタイプと見ることができる。

以上に示した評価方法のいずれかを用いて航路計画に内在するリスクを評価するわけであるが、その

表5-6 リスクに関する性質

一般的なリスクの性質		航路計画におけるリスクの性質
リスク自体の性質	もたらされる結果の大小	軽微なものから極めて重大なものまで広範囲
	もたらされる結果の影響範囲	広範囲にわたる場合もある
	結果がすぐ現われるか否か	即刻現われる
	結果は可逆的か否か	海洋汚染については部分的に回復不可能
	結果が長期間残存するか否か	海洋汚染の一部は長期間残存
	頻度の大小	約1/10000(件/トリップ)程度
リスクを受ける人間の態度	自発的行為によって生ずるか否か	職業上の行為が大部分
	リスクの存在が知られているか否か	十分周知されている
	敏感な人にだけ影響するものか否か	個人的な差異は無視しうる
	注意を払うことにより回避可能か否か	おおむね回避可能
	代替案があるか否か	代替案あり

際、以下の3点が要請される。

- 1) 交通能力の増大を目的として実施される航路整備・利用計画において、事故がもたらす機能の低下は当初の目的達成を妨げる原因となるため、目的達成の信頼度の低下がもたらす便益の減少分を費用として測定し、評価に繰り込む必要がある。
- 2) 航路計画の実施に伴って新たに变化するリスク・便益・費用の増分の帰属が国、船社、操船者、周辺住民、企業、社会経済活動の主体と広範囲にわたり、しかもこれらの増分が個々の帰属主体内部でバランスするとは一般にいえなため、国民経済的観点からの評価を行なう必要がある。
- 3) 航路整備は公共事業であるため、投資額とリスクの減少分との比較において、より効率のよい代替案を選ぶ必要がある。

上記から理解されるように、航路計画に内在するリスクは、その性質上、リスク便益法による評価が望ましいことがわかる。ところで、Otway and Erdmann<sup>46)</sup>はリスクレベルとリスクの受け入れられ方との関連について述べており、McCormick<sup>45)</sup>はこれを表5-7のように整理している。表中のリスクレベルは年間の死亡確率で表わされているため、本研究で対象とする船舶航行に関するリスクとは直接比較することはできないのであるが、第7章で示される衝突事故1件当たりの直接損害額(約3900万円)と自動車事故における死亡者1人当たりの平均的な保険金支払い額(約4500万円<sup>47)</sup>)がほぼ等しいという事実から、船舶衝突事故1件は死亡事故1件にほぼ相当すると見なすことができ、表中の数値をそのまま年間の船舶衝突事故確率に読み替えることができる。一方、山内・藤井<sup>48)</sup>により整理された本邦主要狭水道における年間の船舶衝突事故確率は表5-8に示すように $0.7 \sim 2.6 \times 10^{-4}$ といった大きさで

表5-7 年間死亡リスクの受け入れられかた (McCormic<sup>44)</sup>による)

年間死亡リスクレベル	判 定
$10^{-3}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・このレベルは誰にとっても受け入れ難い。</li> <li>・このレベルの危険をもたらす事故を見出すことは困難である。</li> <li>・リスクがこのレベルに近付くと危険を減らそうとする行動が迅速に取られる。</li> </ul>
$10^{-4}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人々は公的な資金をもって危険をコントロールするための費用の支払いにあてようとする：(交通信号や交通制御, そして消防署)</li> <li>・このカテゴリーの危険に対する安全確保のスローガンが不安の一要素として現れてくる。例えば：“あなたが助ける人生はあなた自身のもの”</li> </ul>
$10^{-5}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人々は既に認識している。</li> <li>・人々はこれらの危険について子供に警告する：(水死, 銃器, 毒物)</li> <li>・飛行機による旅行を避けることのように, 人々はそれを避けることによる不便を受け入れる。</li> <li>・安全のためのスローガンが声高に叫ばれる。</li> </ul>
$10^{-6}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多くの人々はさして関心を抱かない。</li> <li>・人々はこれらの危険に気がついてはいるものの, 自分がそれに遭遇することはないと感じている。</li> <li>・これらの危険に関する警句はあきらめの一要素である：“落雷に二度打たれることはない”, “神の仕業”</li> </ul>

表5-8 主要航路における衝突の発生状況 (山内・藤井<sup>48)</sup>による)

航 路 名	通航量 (千隻)		船と船の衝突 (隻)										衝突 危険度 ( $\times 10^{-4}$ )
	隻 数	L換算 隻 数	トン ~20	~100	~500	~千	~3千	~万	~2万	~10万	10万 ~	計	
津軽海峡	200	294	5	20	7	5	3	4	1	1	0	46	1.6
浦賀水道	935	845	3	2	28	7	6	5	1	5	0	57	0.7
伊良湖水道	980	590	14	3	15	1	3	6	1	0	0	43	0.7
友が島水道	761	582	3	4	12	0	0	2	2	2	0	25	0.4
鳴門海峡	473	236	4	4	38	5	0	0	0	0	0	51	2.2
明石海峡	1937	1176	21	9	63	13	2	8	1	3	2	122	1.0
備讃東部	1680	1174	15	12	75	4	6	5	0	0	0	117	1.0
備讃西部	1069	707	12	6	44	10	5	4	1	3	1	86	1.2
来島海峡	1369	719	8	6	47	10	5	5	2	1	0	94	1.3
音戸瀬戸	812	324	2	4	20	1	0	0	0	0	0	27	0.8
豊予海峡	683	387	7	1	12	1	2	4	3	0	1	31	0.8
関門海峡	939	556	21	30	112	28	27	27	2	5	0	252	4.5



であり、いずれもほぼ  $10^{-4}$  のオーダーである。したがって、この両者から、本研究で対象とするような航路におけるリスクは、人々が公的な財源を投資してその大きさをコントロールすべきであると考えられるようなリスクであることがわかる。すなわち、航路計画に内在するリスクは、リスク自体の性質からだけでなく、その大きさの面からもリスク便益法による評価が望ましいことが明らかとなった。

以上のような検討に基づき、ここではリスク便益法が航路計画における代替案選択という目的に最も沿っていると考え、海上交通におけるリスクの評価方法として適切なものとする。なお、リスクの評価に関する4つの方法のところで紹介したように、リスク便益分析の本来の方法は、当該システムのリスクとそれがもたらす便益を比較し、後者が前者を上回る場合にそのリスクは許容されるとするものであるが、ここでは若干その意味を拡張して、リスクを減少させるための努力とリスクの減少によりもたらされる便益とを比較することにより評価を下そうとしている。この意味では、「リスク・費用・便益法」と呼ぶことがより適切であるとも言える。

## 5-6 結 語

本章では、航路計画を策定するための検討方法について考察を加えた。まず、これまで航路計画を合理的に策定する方法論が確立されなかった理由が、航路計画の目的の不明確さとその達成の程度を示す指標の欠如、および、航路計画の計画変数と目的達成度との関連づけが十分解明されていなかったという点にあることを指摘した。そして、これらをいかに明らかなものとするかという問題意識のもとに、従来の計画方法論に再度検討を加えた。その結果、計画方法論が合理的であるためには、以下の要件を備えていることが必要であることがわかった。

- (1) 検討の各段階における作業の目的と、段階を経るに従って蓄積されて行く一連の結果が、計画案の選定にどのように貢献するかが明示的に示されていること。
- (2) 計画代替案を実施した結果、計画の目的をどの程度達成することになるのか、ということが十分定量化されていること。
- (3) さらに、それが複数の航路機能に関して互いに比較しうるものであり、航路機能間のトレード・オフを解決するものであること。
- (4) 加えて、複数の評価主体に関する全体的な最適性の裏付けを有すること。
- (5) 航路上における交通の輻輳状況を考慮に入れられるものであること。

そこで、この結果を踏まえて航路計画のシステム分析を行ない、計画方法論の基本的枠組みを提示した。ここでは、航路を危険（リスク）が存在するシステムととらえ、リスク・アセスメントの手順を援用して構築している。次章以降で個々のサブシステムの内容に検討を加えた後、第9章で“航路計画の検討手順”としてとりまとめられる。

## 参考文献

- 1) Y. NAGAO, K. KURODA, H. KITA and K. INOUE : Safety Improvement Planning of Narrow Waterway, Proc. of 26th International Navigation Congress, P. I. A. N. C., Brussels, 1985
- 2) 長尾・黒田・喜多：リスク・便益分析に基づく水路改良計画に関する方法論的研究，土木学会論文報告集（投稿中）
- 3) 加納治郎：計画の科学，経済往来社，pp.11 ～ 13, 1963
- 4) 長尾義三：土木計画序論，共立出版，pp.22 ～ 23, 1972
- 5) 佐佐木綱：計画基礎数理，第1回土木計画学シンポジウム，pp.29 ～ 30, 1967
- 6) M. Wohl and B. Martin : Traffic System Analysis, McGraw-Hill, p.4, 1967
- 7) たとえば，岡野行秀・山田浩之：交通経済学講義，青林書院新社，pp.39 ～ 40, 1974
- 8) 港湾の開発，利用及び保全並びに開発保全航路の開発に関する基本方針を定める件，運輸省告示第 278号，1974
- 9) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.6-2, 1979
- 10) 運輸省港湾局：瀬戸内海航路整備計画書，1963
- 11) 運輸省港湾局計画課：開発保全航路一覧，1982
- 12) N. Matthews and R. Tresfon : The Harmonization of Vessel Traffic Service Procedures, Proc. of Fifth Int. Symp. on Vessel Traffic Services, Session 0, pp.1 ～ 5, 1984
- 13) H. Agerschou et al. : Planning and Design of Port and Marine Terminals, John Wiley & Sons, p.91, 1983
- 14) 宮川公男：PPBS の原理と分析，有斐閣，pp.432 ～ 436, 1969
- 15) 前出 4)，pp.110 ～ 112
- 16) 長尾・喜多・笠島：予測の不確実性と計画目標期設定，第3回土木計画学研究発表会講演集，No 336, pp.139 ～ 147, 1983
- 17) 長尾義三・笠島勝治：不確実な需要下における計画目標期の設定，土木学会論文報告集，No 336, pp.139 ～ 147, 1983
- 18) 運輸省港湾技術研究所：港研業務資料－航路設計のための基礎資料，pp.13 ～ 14, 1981
- 19) 栗栖義明：港工学，森北出版，pp.212 ～ 213, 1974
- 20) The IInd International Oil Tanker Commission, PIANC : The Final Report on “Big Tankers and Their Reception ” in the PIANC Bulletin, 1974

- 21) 港湾の施設の技術上の基準を定める省令, 昭和49年運輸省令第30号
- 22) 西日本港湾運航技術研究会: 航路計画調査 ―長大航路における航路幅員決定法について―,  
1977
- 23) 豊田清治: Dead Weightと航路幅, 水深との関係, 航海, №29, pp.102 ~ 105, 1969
- 24) 飯島幸人・本田啓之輔: 港湾水路の幅員について, 日本航海学会論文集, №50, pp.91 ~ 102,  
1973
- 25) 井上欣三: 船舶交通量を考慮した航路幅員決定法, 日本航海学会論文集, №62, pp.67 ~ 76,  
1980
- 26) I. Oldenkamp : Statistical Analysis of Ship Manoeuvres, Symposium "Ship's  
Handling", Wageningen, 1973
- 27) 黒田勝彦ほか: リスク・アナリシスによる内陸運河の改修計画法, 土木計画学研究・講演集,  
№7, 1985
- 28) 日本海難防止協会: 余裕水深調査研究報告書, pp.11 ~ 27, 1976
- 29) 長尾義三: 港湾技術の発展に関する方法論的研究, p.484, 京都大学学位論文, 1961
- 30) 喜多秀行・長尾義三: 待ち行列モデルを用いた道路交通解析とその応用に関する研究, 第32回土  
木学会年次学術講演会講演概要集, 第4部, pp.318 ~ 319, 1977
- 31) 福島弘: 海難防止論, 成山堂, pp.46 ~ 48, 1972
- 32) 木俣昇・石崎肇士: シミュレーションによる航路計画の研究, 土木学会論文報告集, №184,  
pp.113 ~ 126, 1971
- 33) G. I. Vaganov et al. : Methods of Increasing Waterway Capacity and Improving Safety  
of Navigation, Proc. of 25th Int. Nav. Cong., P. I. A. N. C., Sec.1, Vol.2, pp.401 ~ 411,  
1982
- 34) たとえば, A. V. Whyte and I. Buton eds. : Environmental Risk Assessment. SCOPE,  
1980
- 35) 建設省近畿地方建設局: 河川工学百年の歩みと淀川, pp.448 ~ 478, 1978
- 36) 日本河川協会編: 建設省河川砂防技術基準(案) 計画編, 山海堂, pp.9 ~ 29, 1976
- 37) 日本道路公団・日本海難防止協会: 東京湾横断道路海上交通安全調査第二専門委員会報告書,  
pp.89 ~ 106,
- 38) A. H. Whillet : The Economic Theory of Risk and Insurance, Oxford Univ. Press, 1951
- 39) F. H. Knight : Risk, Uncertainty and Profit, University of Chicago Press, 1971
- 40) I. Pfeffer : Insurance and Economic Theory, Richard D. Irwin, pp.41 ~ 42, 1956

- 41) C. A. Williams and R. M. Heins : Risk Management and Insurance, McGraw-Hill, 1964  
(武井勲訳：リスク・マネジメント (上), 海文堂, p. 3, 1978)
- 42) W. D. Rowe : An Anatomy of Risk, John Wiley & Sons, p.24 1977
- 43) A. E. Green : Safety Systems Reliability John Wiley & Sons, p.2, 1983
- 44) 東京海上火災保険 (株) 編：海上保険の理論と実務, 海文堂, p.14. 1978
- 45) N. J. McCormic : Reliability and Risk Analysis, Academic Press, p.368, 1981
- 46) H. J. Otway and R. C. Erdmann : Reactor Siting and Design from a Risk Viewpoint, Nuc.  
Eng. and Design, Vol. 13, №2, pp.365 ~ 376, 1970
- 47) 総理府編：昭和59年版交通安全白書, p.235, 1970
- 48) 山内宏之・藤井弥平：海上交通事故の研究—VI—交通事故危険度の再調査—, 日本航海学会論  
文集, №60, pp.45 ~ 49, 1979

## 第6章 船舶衝突事故率による航路整備と航行規制の評価\*

### 6-1 概 説

交通流のマクロな状態を記述する指標には交通密度や平均速度あるいは交通量・交通容量比といった数多くのものがある。これらの指標は、“何のためにどのような観点から交通流の状態を記述するのか”という目的に応じて適宜選択されるべきである。

改良すべき航路を見出すために複数の航路を比較する場合、あるいは航路整備の実施に伴ってそこを航行する交通の状態がどの程度改善されたかを評価しようとする場合には、交通の円滑さや混雑度を表わす指標に着目し、その差異を知ることによりその目的を達することができる。その際重要なことは、航路計画の計画変数の値の差異が着目している指標に敏感に反映されること、および当該指標が意味するものが評価項目と一致していることの2点である。評価の対象となる海上交通流の望ましさを総合的に評価し、記述する指標は今のところ見つかっていないため、交通流の総合評価はいくつかの評価指標により測定された評価値をなんらかの形で統合して行うことが必要となるが、このような場合においてもなるべく主要な部分を広範囲に含む指標を選んでおくことが有用である。

2-2でも述べたように、海上交通流の特徴の1つは、混雑の程度が迅速性ではなく主として航行安全性（またはその逆の事故危険度）の変化として現れることである。したがって、航行安全性を示す指標は混雑の程度を示すよい指標ともなりうる。また、航行安全性の大小は、もとより計画主体と利用者の双方にとって最大の関心事でもある。そこで、本章では航行安全性の観点から航路計画の評価を行う。ここで、航路上での航行安全性を表わす指標には、避航確率<sup>3)</sup>や操船上の負担を示す指標度<sup>4)</sup>などいくつかのものがあるが、5-5-2のリスクの同定のところで示したような理由から、以下では航行船舶相互の衝突事故確率をもって航行安全性の指標とする。

種々の計画変数の下での評価値の算定には第3章で提案したOSHICOP-モデルを用いることとし、第2節で航路整備が航行安全性に及ぼす影響を、第3節で航行規制が航行安全性に及ぼす影響をそれぞれ明らかにする。

### 6-2 航路整備が航行安全性に及ぼす影響

#### 6-2-1 航路の拡幅

鉄道や道路では、交通量の増加に対して複々線化や車線増設で対応を図るが、航路にはレーンの概念もなく、これまで拡幅に伴う衝突確率の低減効果は定量化されていなかった。(2.11),(2.12),(3.6)および

---

\* 本章の一部は文献1), 2)として発表している。

(3.7) 式から、航路幅 $W$ を増大させると同航船、反航船いずれの場合も、その出会い確率が減少することが容易に証明できる。また、OSHCOP-モデルによる計算結果から、図6-1に示すごとく、航路幅 $W$ が広くなるにつれて衝突確率 $R_c$ が単調に減少し、航路幅の対数と衝突確率の対数とがほぼ線形関係にあることがみてとれる。これより、たとえば、交通量が一定の場合、航路幅を2倍に拡張すると1隻1トリップ当たりの平均衝突確率はほぼ半分になることがわかる。一方、航路交差点における交差船舶との衝突確率は拡幅によって何ら変化しない。これ

は、船舶がほぼ平行して航行しているような航路にあっては航路の拡幅が出会い確率を減少させ衝突確率も減少するのに対し、交差船舶に対しては、結局は交差点のどこかで出会うことになるため、何ら影響を及ぼさないからである。ただし、同一の出会い確率の下で出会い領域は広がっているため、多重遭遇の確率は小さくなる。したがって多重遭遇を考慮に入れる場合には航路を拡幅することにより交差船舶との衝突確率の減少が期待できる。

ところで、航路横断橋が存在する場合ではどうか。図6-2に示したのは、スパン長 $L_s$ を一定として航路幅 $W$ を変えていった時の年間期待衝突事故件数 $\bar{N}_c$ の変化である。 $W$ の減少に伴い、破線で示した船舶相互の衝突件数が増加するのに対し、実線で示した橋脚への期待衝突件数は減少する。航路幅が減少すれば航行位置分布の平均値は中央寄りとなり、標準偏差も小さくなる。このため、航路上の船舶密度は高くなり、船舶相互の衝突は増加するが橋脚からは離れ

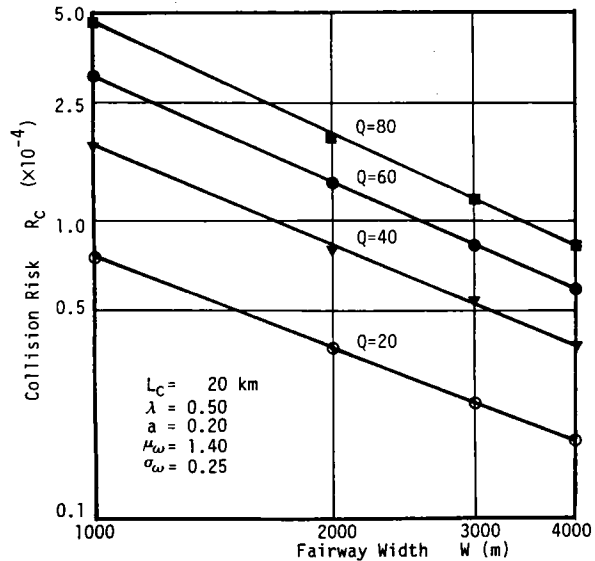


図6-1 航路幅の変更が衝突確率に及ぼす影響

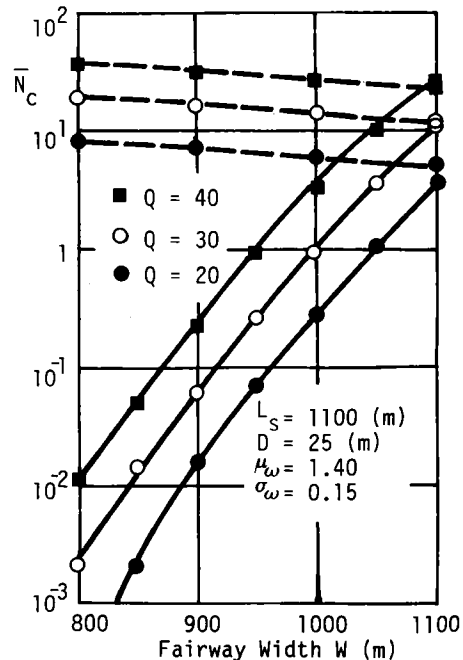


図6-2 航路幅と年間期待衝突件数

て航行することになるので、橋脚への衝突件数は減少する。したがって、この結果のみによっても衝突危険度を最も小さくする航路幅を求めることができる。

### 6-2-2 航路中央分離表示の設置

航行位置分布は航路側端の境界条件に依存して平均値の位置が変わるとともに、ブイによる中央分離表示の設置によっても変化する。航路側端の境界条件を変えることは実際には多額の費用を要するため容易ではないが、ここでは航行位置分布の分散を一定としたまま平均値のみを、航路中央から平均航行位置までの距離と航路幅との比  $a$  (式(2.12)参照) を指標として、 $a = 0.10 \sim 0.25$  の範囲で動かした。ここで、 $a$  の値と航路の状態には、

$a = 0.10$  両側がバンクでかつ航路中央分離表示による航行分離がなされていない航路

$a = 0.20$  両側がバンクでかつ航路中央分離表示による航行分離がなされている航路

$a = 0.25$  航路中央分離表示による航行分離がなされており、かつ両側に余裕水域を有する航路なる対応関係がある<sup>5)</sup>。なお、 $a = 0.15$  は  $a = 0.10$  と  $a = 0.20$  の中間的狀態、すなわち、目安となるブイが打ってある場合や、中央分離表示がなくかつ両側にある程度の余裕水域を有する場合に対応する。

結果を図6-3に示す。衝突確率の変化の挙動

は方向別交通量比  $\lambda$  によって大きく異なる。 $\lambda = 0.0$  あるいは  $\lambda = 1.0$  の場合は、観測された航行位置分布データに基づくモデル式(2.12)による限り、衝突確率が変化しないのは当然の帰結であるが、これと対比する実績データはいままで得られていない。ところで  $\lambda$  が 0.5 に近づくに従って航行分離の効果が顕著に現れてくる。両側がバンクの航路に中央分離表示を設置するのみで、 $\lambda = 0.2$  あるいは  $\lambda = 0.8$  の場合に約70%、 $\lambda = 0.5$  の場合には約80%もの衝突確率の減少が期待できる。

現在、わが国では浦賀水道航路や備讃瀬戸東航路

などの開発保全航路に指定されている主な航路では航行分離がなされているが、未だ中央分離表示のない両側通行航路も少なくない。ブイの設置費自体は航路拡幅費用に比べて少なくてすむことでもあり、有効な施策であるといえよう。

### 6-2-3 航路中央分離表示の変移

これまで、航路中央分離表示は文字通り航路中央に設置するものと考えてきた。しかし、これまでの検討から、方向別交通量比  $\lambda$  が1に近いような状態が生じる航路では、方向別交通量比に応じた中央分

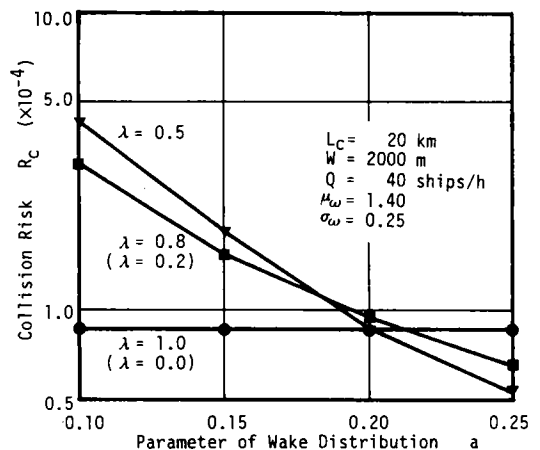


図6-3 航路の境界条件と衝突確率との関係

離表示の変移が、衝突確率を減少させるうえでの1つの有効な方法となることが示唆される。そこで、方向別交通量比のみが変わる場合に中央分離表示の変移がどのような効果をもたらすかについて検討する。

図6-4は、航路全体の幅を一定としたまま交通量が卓越する方向の片側航路幅が当初の $r_W$ 倍（したがって反対方向の片側航路幅は $(2 - r_W)$ 倍）となるように中央分離表示を変更し、衝突確率に及ぼす影響を種々の方向別交通量比に対して計算したものである。図中の実線は航行位置分布のパラメーター $a$ が0.20の場合に、破線は0.25の場合にそれぞれ対応している。 $a=0.20$ の場合、 $\lambda$ が0.6より小さい範囲では中央分離表示の変移による衝突確率減少効果はまったくみられないが、 $\lambda$ が0.7あるいは0.8になると、片側航路幅を1.2倍にすることが衝

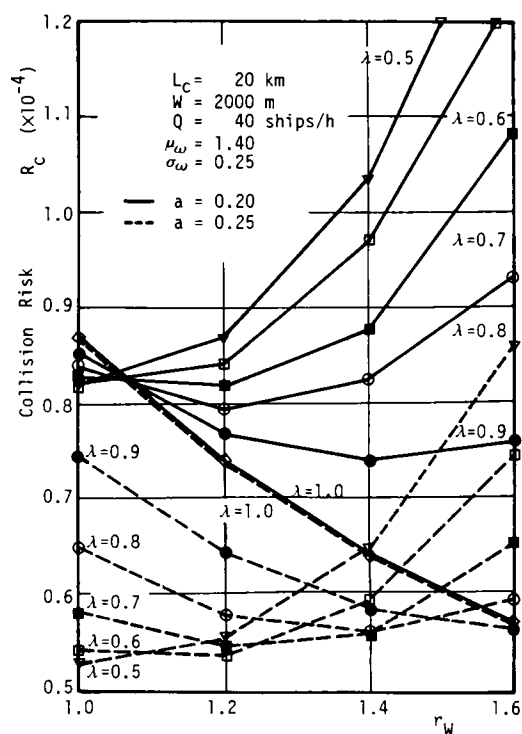


図6-4 航路中央分離表示の変移効果

突確率を減少させる。 $\lambda$ が0.9になると、片側航路幅を1.4倍に広げることによりさらに大きな効果が期待できる。 $\lambda$ が1.0、すなわち対向船舶が存在しない状態は現実にはきわめてまれであるが、この場合は当然のことながら航路全体を一方通行航路として利用することが最善となる。 $a=0.25$ の場合は一層顕著な効果がみられ、 $\lambda$ が0.6の場合でも中央分離表示の変移がわずかながらも効果を上げる。 $\lambda$ あるいは $a$ の違いによって同じ $r_W$ でも衝突確率に及ぼす影響が異なるのは、後の方向別交通量比の変動による影響のところで考察を加えるが、反航船に対する衝突確率と同航船に対する衝突確率の双方に及ぼす影響の大小関係が全体の衝突確率の変化を規定していることによる。したがって、実施に際してはこれらのことを勘案して適切な施策を選定する必要がある。図からも理解されるように、航路両側に余裕水域を有する航路では効果は特に大きく、ここで設定された諸条件のもとでは $\lambda$ が0.8の場合でも約15%も衝突確率が減少する。

なお、このような方策はすでに道路において交通容量の増大化や混雑の解消策として用いられている。航路において中央分離表示を動かすことは技術的には困難であるかもしれないが、陸上部に設置される導灯や導標の利用など実施可能な方法も考えられる。



#### 6-2-4 航路交差角の変更

主航路に交差航路が1本交わっている航路交差部を想定し、主航路を通過する船舶の1トリップ当たり船舶衝突確率を求めた。図6-5は、航路の交差角 $\phi$ と主航路の衝突確率との関係を示したものである。この結果からは航路が直角に交わった場合が最も危険と言える。そして、交差角を小さくし、道路におけるウィービング区間のように分合流を基本とした航路設定が事故率を小さくす

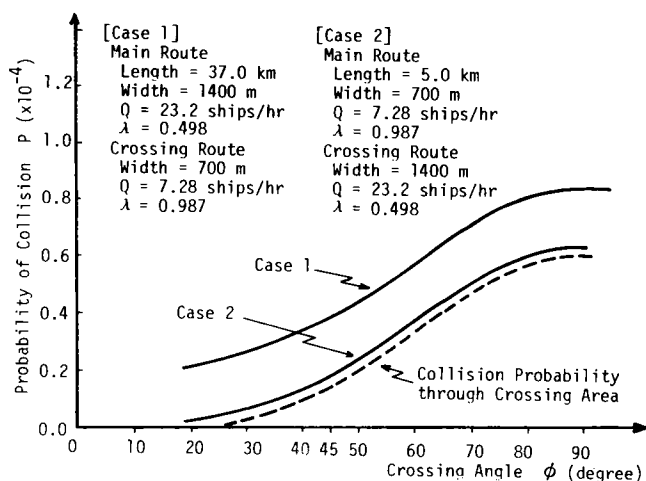


図6-5 交差角と衝突確率の関係

る視点から有利であることが明らかとなった。この理由の1つは、避航開始距離は2船間の距離によって決定される部分が大きく、航路交差角にはよらないため、同じ船間距離を有する2隻であっても交差角 $\phi$ が小さい時の方が衝突予想点（両船の進路の交点）に至る余裕時間が長く、避航に成功する可能性が高いためと思われる。また、避航のために必要となる側方変位量が、義務船から見た保持船舶船長の射影に比例するため、限界避航開始距離が交差角により変化することも影響していよう。

#### 6-2-5 横断橋橋脚までの緩衝帯の設置

図6-6における実線は、スパン長 $L_s$ の変更に伴う年間期待衝突件数 $\bar{N}_c$ の変化を示すものである。OSHCOPモデルの教えるところによれば、船舶相互の衝突は航路幅が変わらない限り一定であるが（図中破線）、 $\bar{N}_c$ は $L_s$ が増加することによりかなり急激に減少することがわかる。これは、航路幅 $W$ が一定のまま $L_s$ が増加すれば緩衝帯幅が広がることになるため、これに起因する効果である。この結果を見る限りでは、片側90 m（交通量毎時20隻）、ないしは140 m（同40隻）ずつ緩衝帯幅をとることにより、想定した条件の下では $\bar{N}_c$ はほぼ100年に1件となり、橋梁自体の耐用年数を考え合わせると、この程度の緩衝帯幅を設けておけば、衝突に対する安全性の面からは十分であることがわかる。

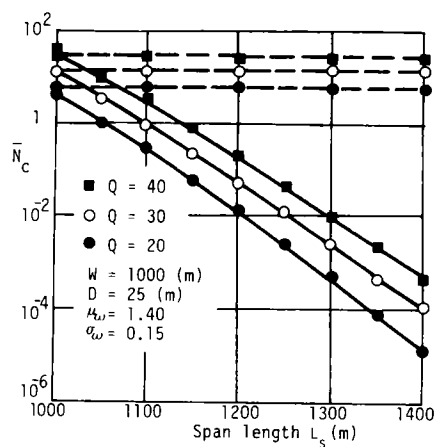


図6-6 スパン長と年間期待衝突件数

### 6-3 航行規制が航行安全性に及ぼす影響

#### 6-3-1 交通特性と衝突確率との関係

航行規制の方策を探るに先立ち、現状のまま何ら施策を講じない場合に、交通特性の変化によってどの程度航行安全性が変化するかを把握するための検討を行う。

##### (1) 交通量と衝突確率

図6-7は、一様な航路において、他の諸特性を一定とした時の、交通量 $Q$ と衝突確率 $R_c$ との関係を図示したものである。これより、交通量の対数と衝突確率の対数との間にはほぼ線形関係が成立しており、衝突確率は交通量の冪乗に比例して増加することがわかる。交通量の増加に伴う衝突確率の増大は、航路内での出会い隻数の増加に起因している。

一方、図6-8は、主航路に交差航路が1本交わっている航路交差点部を想定し、交差航路の交通量を変化させたものである。交差航路の交通量の増加は主航路を航行する船舶の衝突確率を増大させるが、今回は多重遭遇を考慮していないため、交通量が増えても衝突確率はさほど急激に増大するといった結果とはなっていない。

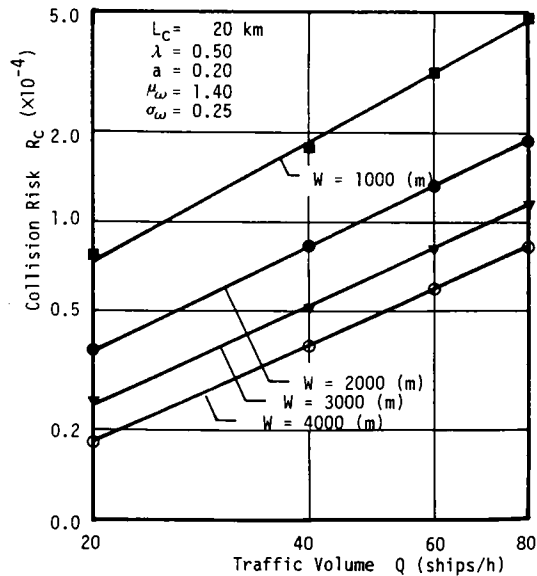


図6-7 時間交通量の変化が衝突確率に及ぼす影響

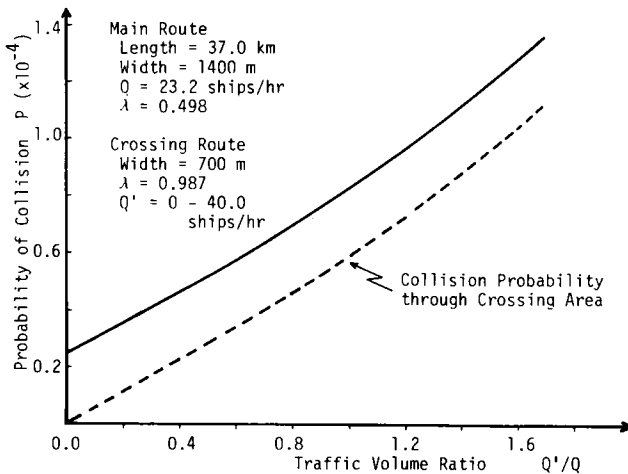


図6-8 交差交通量と衝突確率との関係

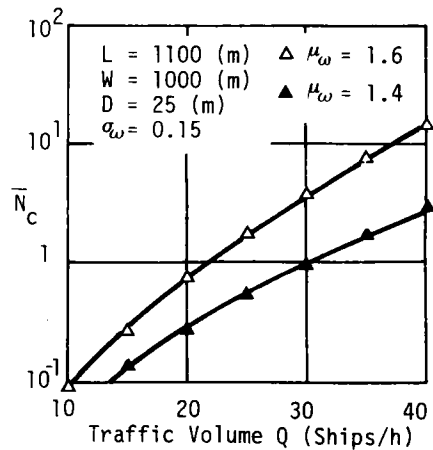


図6-9 交通量と年間期待衝突件数

また、図6-9は、交通量 $Q$ の変化と航路横断橋橋脚への年間期待衝突件数 $\bar{N}_c$ の関係を示すものである。 $Q$ が増加すれば、それに伴い $\bar{N}_c$ も増加することは容易に予測できる結果ではある。

## (2) 船型構成分布と衝突確率

さらに、交通量だけでなく、航行船舶の船型構成分布もまた衝突確率に大きく影響している。一般に船型が大きくなるほど衝突に関する危険性は高いと考えられている<sup>6)</sup>。これは大型船の操縦性能の悪さや死角の大きさに起因するところが大いと思われるが、実際には大型船の操船者は小型船の操船者に比べて一段と高い技術ならびにそれを保証する資格が要求され、さらにこれら大型船が有する危険性の高さを認識したうえで慎重に操船しているため、極端に異なるわけではない。第2章で示した避航開始距離は船型が大きくなるほど長くなる（反航船に対する避航開始距離は航行速度により規定されるが、2-6-3で示したように航行速度は一般に船型が大きくなるにつれて増大するため）。これは、船型が大きくなるほど操船者が余裕をもって避航しようとする当然の結果であるが、反面、本モデルで定義した限界避航開始距離も船型が増大するにつれて長くなり、出会いの確率も大きくなる。したがって、他の条件が同じなら、出会い確率ならびに限界避航開始距離の増大といったいわば危険側の効果と、避航開始距離が長くなるという安全側の効果とのバランスにより、船型別にみた衝突危険度は異なってくる。

本モデルでは船型を船舶長 $L$ で表現しており、航行船舶の対数船舶長 $\omega$ が正規分布、 $N(\mu_\omega, \sigma_\omega^2)$ に従うと仮定している。そこで、船舶長の対数平均 $\mu_\omega$ と対数標準偏差 $\sigma_\omega$ を変化させてみた。図6-10に $\mu_\omega$ による影響を、図6-11に $\sigma_\omega$ による影響を示す。これらの図から、 $\mu_\omega$ と衝突確率の対数とがほぼ線形関係にあり、 $\sigma_\omega$ についても同様の傾向を示すことがみてとれる。なお、表6-1に $\mu_\omega$ 、

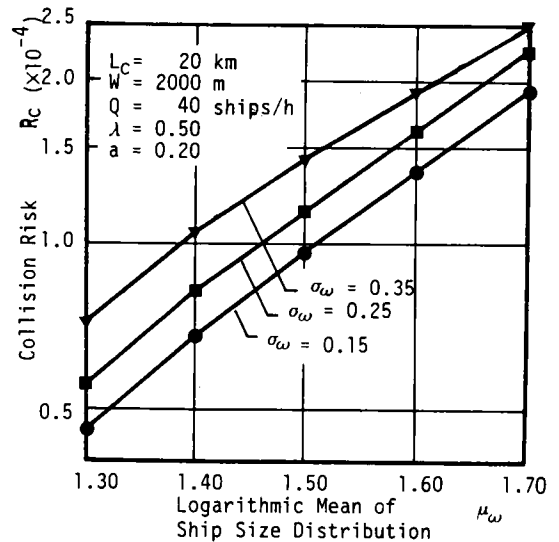


図6-10 平均船型の変化が衝突確率に及ぼす影響

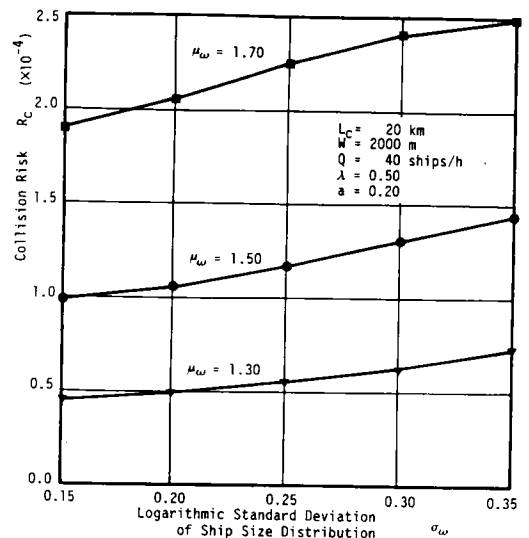


図6-11 船型構成のばらつきの大きさが衝突確率に及ぼす影響

$\sigma_\omega$ と船舶長 $L$  (m) および総トン数 $GT$  (ton)との対応を示しておく。

船舶が大型化しつつあるなかで、大型船を通行可能とするための航路の増進などが要請されているが、その結果平均船型が大きくなり、また船型構成の分散を大きくする場合がある。交通量一定のもとでは航行安全性の低下を招くため、同等の安全性を保つためには、これと並行して航路拡幅などの安全対策をとる必要のあることがわかる。

表6-1  $\mu_\omega$ ,  $\sigma_\omega$ と船舶長 $L$ , 総トン数 $GT$ との対応

$\mu_\omega \backslash \sigma_\omega$		0.15		0.25		0.35	
		$L$ (m)	$GT$ (t)	$L$ (m)	$GT$ (t)	$L$ (m)	$GT$ (t)
1.40	$\mu_\omega - 2\sigma_\omega$	12.6	19	7.9	5	5.0	2
	$\mu_\omega - \sigma_\omega$	17.8	51	14.1	26	11.2	14
	$\mu_\omega$	25.1	133	25.1	133	25.1	133
	$\mu_\omega + \sigma_\omega$	35.5	352	44.7	672	56.2	1,279
	$\mu_\omega + 2\sigma_\omega$	50.1	926	79.4	3,377	125.9	12,333
1.50	$\mu_\omega - 2\sigma_\omega$	15.8	36	10.0	10	6.3	3
	$\mu_\omega - \sigma_\omega$	22.4	96	17.8	51	14.1	26
	$\mu_\omega$	31.6	254	31.6	254	31.6	254
	$\mu_\omega + \sigma_\omega$	44.7	672	56.2	1,279	70.8	2,447
	$\mu_\omega + 2\sigma_\omega$	63.1	1,770	100.0	6,457	158.5	23,555
1.60	$\mu_\omega - 2\sigma_\omega$	20.0	70	12.6	19	7.9	5
	$\mu_\omega - \sigma_\omega$	28.0	184	22.4	96	17.8	51
	$\mu_\omega$	39.8	485	39.8	485	39.8	485
	$\mu_\omega + \sigma_\omega$	56.2	1,279	70.8	2,447	89.1	4,668
	$\mu_\omega + 2\sigma_\omega$	79.4	3,377	125.9	12,333	199.5	44,961
1.70	$\mu_\omega - 2\sigma_\omega$	25.1	133	15.8	36	10.0	10
	$\mu_\omega - \sigma_\omega$	35.5	352	28.2	184	22.4	96
	$\mu_\omega$	50.1	962	50.1	962	50.1	962
	$\mu_\omega + \sigma_\omega$	70.8	2,447	89.1	4,668	112.2	8,922
	$\mu_\omega + 2\sigma_\omega$	100.0	6,457	158.5	23,555	251.2	85,912

### (3) 方向別交通量比および平均航行位置と衝突確率

一方、交通特性としての航路交通量は時間変動が大きく、また主要港湾との位置関係や潮流にもよるが、一般にはピーク時は方向により異なる。図6-12は文献7)による浦賀水道での交通量観測結果から方向別交通量比 $\lambda$ の24時間の変動を求めた一例である。図6-13は方向別交通量比 $\lambda$ を変化させて衝突確率の変動をみたものである。これより、 $\lambda$ が衝突確率に及ぼす影響は航行位置分布の平均位置を表す

パラメーター  $a$  と深い関係にあることがわかる。 $a$  が 0.10 あるいは 0.15 の場合、すなわち中央分離表示がない場合は  $\lambda$  が 0.5 に近づくほど衝突確率は増えるが、逆に  $a$  が 0.25 の場合、すなわち中央分離表示がある場合は減り、 $a$  が 0.20 の場合にはほとんど変動がみられない。この結果は以下のごとく解釈できる。

衝突確率を、反航船に対するものと同航船に対するものに分けて考える。方向別交通量比が 0.5 に近づくにつれ、同航船との衝突確率は減少する。この減少の程度は中央分離表示の有無には影響されない。一方、反航船に対する出会い確率は大きくなり、このことが衝突確率の増大をもたらす。ここには示さないが、式 (3.3) より求められる避航失敗確率は反航船に対するものの方が同航船に対するものより 2～4 倍大きいという実績値<sup>8), 9)</sup>にほぼ見合った結果が得られている。中央分離表示がある場合、この増大の程度はさほど大きくないが、中央分離表示がない場合はかなり顕著なものとなる。これらの結果、中央分離表示がある場合は反航船との衝突確率の増大よりも同航船との衝突確率の減少が卓越し、航路全体の衝突危険度  $R_c$  は減少する。逆に、中央分離表示がない場合は反航船との衝突確率の

増大が同航船との衝突確率の減少より卓越するため、 $R_c$  は増大する。つまり  $\lambda$  が変化する場合、反航船に対する衝突確率の増減の度合いと、同航船に対する衝突確率の増減の度合いの大きい方が、全体としての衝突確率の変化の挙動を規定することとなる。

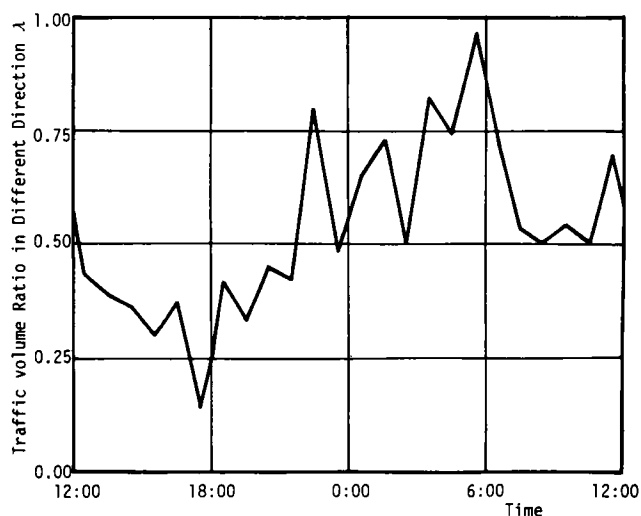


図6-12 方向別交通量比の時刻変動

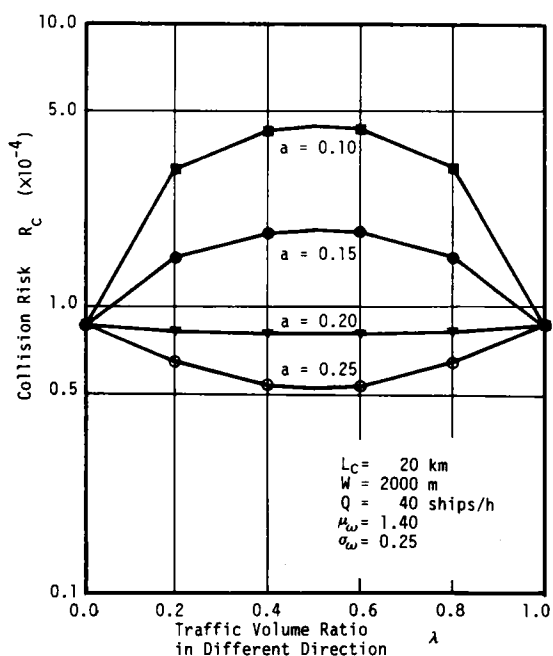


図6-13 方向別交通比の変化が衝突確率に及ぼす影響

なお、航行位置分布のパラメーター  $a$  の値を 0.2 から 0.1 へと変えるだけで  $\lambda$  の変化に伴う衝突確率の変化の挙動がまったく逆になり、感度が高すぎるようにもみえるが、 $a$  を変えることにより反航船との出会い確率は 6 倍強に増加しており、先に述べた反航船に対する避航失敗確率の大きさとも考えあわせると、十分納得のいく結果といえよう。

以上の結果を踏まえ、以下では、交通量規制、航行速度制限、航行最大船型規制を行なった場合の衝突確率に及ぼす影響を検討する。

### 6-3-2 時間交通量の制限

先に示した図 6-7 から、逆に、単位時間交通量を制限することの効果を読み取ることができる。たとえば、時間交通量を 40 隻から 10% および 20% カットすると、衝突確率はそれぞれ 12% および 23% 減少する。時間交通量制限の 1 つの具体的方法は、航路での航行管制を実施することにより、航路入口で進入制限をかけることである。衝突確率はほぼ交通量の冪乗に比例して増大するため、この航行規制は特にピーク時に実施して単位時間交通量の平滑化を図る場合に有効であると考えられる。

また、一般に、ピーク時には方向別交通量比が 1 に近い値となっていることが多いため、卓越している側の交通量を制限したり、大型船の通過時刻を指定して方向別交通量比を 0.5 に少しでも近づけることが、図 6-13 から理解できるように、特に航路分離が行われている主要航路で相乗的な効果をもたらす。

ただし、本規制は航路を通過する船舶に待ちを強いる結果となるため、最終的には航行安全性だけでなく船舶の時間価値などをも含めた形での検討が必要となる。あるいは、航路入口における規制といった予期せぬ待ちを強いる方法ではなく、たとえば浦賀水道航路のような港湾前面に存在する航路では広域的な管制による出港時刻の調整、さらには海上交通の枠を越え、航路における航行安全性を考慮した輸送分担の検討といった形で考慮されるべきであろう。

### 6-3-3 最高速度の制限

航路内で航行速度に上限を設ける場合を想定し、この効果を定量化するための試算を行った。計算にあたっては、式 (3.17) における航行速度の確率密度関数  $f(V.)$  の代わりに、

$$f'.(V.) = \begin{cases} f.(V.) & 0 \leq V. < V_{max} \\ \int_{V_{max}}^{\infty} f.(V.) dV. & V. = V_{max} \end{cases} \dots\dots\dots (6.1)$$

を用い、積分範囲の上限も  $V_{max}$  とする必要がある。ここに、 $V_{max}$  は設定される最高速度である。

結果を船型構成分布の平均  $\mu_{\omega}$ 、標準偏差  $\sigma_{\omega}$  と関連づけて整理したものが図 6-14、図 6-15 である。航路に最高速度制限を設けることが衝突確率に及ぼす効果は、以下の 2 点から説明される。その 1 点は対象としている船舶交通流が速度のばらつきを有するため、最高速度制限を設けると追い越し隻数が減

少し、追い越しにかかわる衝突確率が小さくなることである。他の1点は、(2.2)式および(3.2)式からもわかるように、反航船との避航に際して高速で航行する船舶ほど一般に余裕をみて避航を開始する傾向にあるため、最高速度を越える速度で航行していた船舶については避航開始距離が短くなることが考えられるが、限界避航開始距離は変化しないため結果として避航失敗確率が大きくなることである。そして、実際の効果にはこの2つの効果のうち卓越する側の効果が反映される。

ここでは、設定する最高速度が10ノットを下回らない範囲ではすべて追い越し隻数の減少効果が卓越するが、10ノット以下になると追い越し隻数の減少効果よりも避航開始距離の減少による避航失敗確率の増大効果の方が大きくなる。この傾向は平均船型の大きい交通流で特に顕著であるので、このような船舶交通流では速度制限は10ノット以下にすべきでないと考えられる。このようなことから、現在、海上交通安全法に基づく最高速度制限が12ノットに設定されているのは妥当な値であるといえよう。

#### 6-3-4 最大船型の規制

本研究で用いたモデルでは、すでに述べたように船型を船舶長 $L$ で表現している。しかしながら、最大船型を設定する際に船舶長よりもトン数で記述した方が感覚的に理解しやすいため、船舶長と関連づけて整理されている総トン数(2-6-5

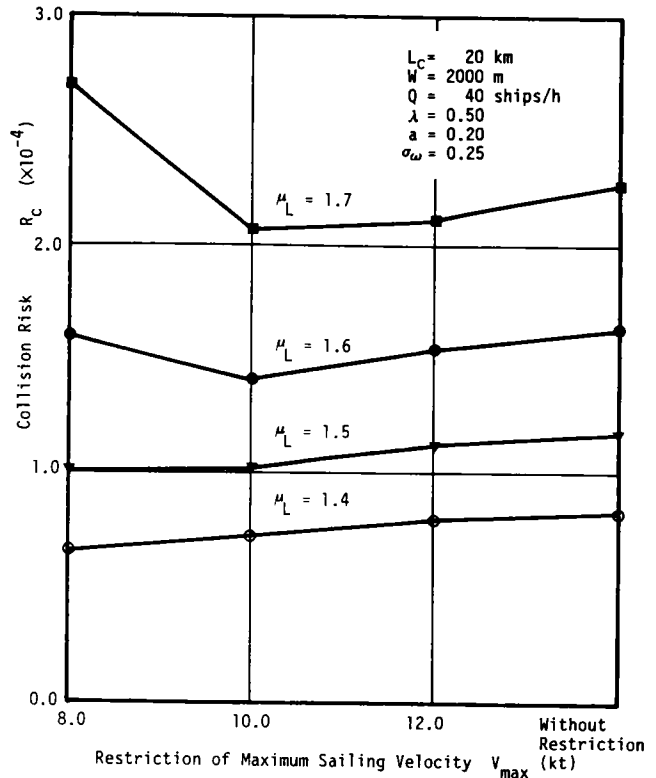


図6-14 最高速度制限の効果と平均船型との関係

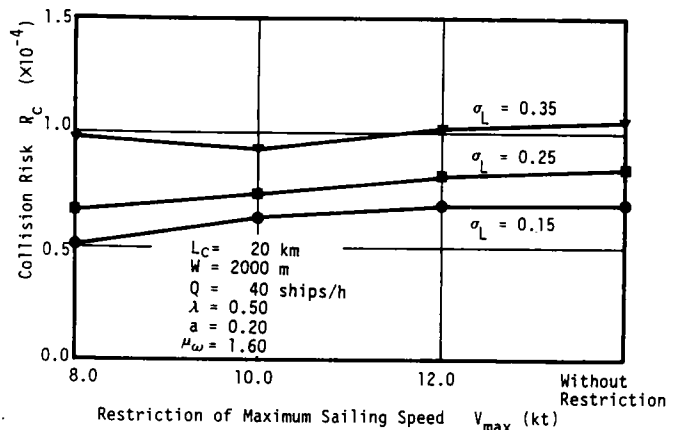


図6-15 最高速度制限の効果と船型構成のばらつきとの関係

参照)を用いることとした。それゆえ、重量トンを用いている船種に関してはこれを換算する必要がある。

航行船舶の船型に上限を設けることの規制効果は、次の2つの状況を想定して求めた。1つは、規制がないときに航行していた船舶のうち、最大船型を越えるものが分担していた輸送量が、他の航路に迂回するかあるいは海運以外の輸送機関に転換すると考えるものである (Case 1)。この場合、当該航路における交通量は規制のないときよりも減少することになる。計算にあたっては、式 (3.18)、式 (3.19) の  $\phi(\omega.)$  の代わりに、

$$\phi'(\omega.) = \frac{\phi(\omega.)}{\int_0^{GT_{max}} \phi(\omega.) d\omega.} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

を用い、積分範囲の上限も  $GT_{max}$  とする。また、他の1つは、最大船型を越える船舶が輸送していた貨物量を、規制にかからない船型の船舶で輸送するとするもので、航行可能な船舶の船型構成の比率は一定のまま、交通量は規制がない場合より増加することとなる (Case 2)。この場合も計算には上述の  $\phi'(\omega.)$  を用い、さらに式 (3.17) の  $\bar{n}_{kk'}$  を、

$$\bar{n}'_{kk'} = \frac{\int_0^{\infty} GT(\omega.) \phi(\omega.) d\omega.}{\int_0^{GT_{max}} GT(\omega.) \phi(\omega.) d\omega.} \cdot \bar{n}_{kk'} \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

とする。ここに、 $GT_{max}$  は許容される最大船型を、 $GT(\omega.)$  は対数船舶長  $\omega.$  の船舶の総トン数を表す。

図6-16、図6-17に前者の結果を破線で、後者の結果を実線で示す。Case 1では、図6-16から  $\mu_{\omega}$  が1.50以下では10000 G.T. までの船型制限はほとんど効果のないことがわかる。また、 $\mu_{\omega}$  が1.70の場合でも50000 G.T. より小さい船型を最大船型として設定しなければ実質的な効果はなく、30000 G.T. で7%、10000 G.T. でも19%しか衝突確率を減少させない。一方、図6-17から、 $\sigma_{\omega}$  が0.35の場合最大船型を50000 G.T. と設定しても約4%、30000 G.T. で12%、10000 G.T. で28% とかなり効果のあることが読み取れる。これは、規制にかかる船舶隻数の総隻数に占める比率に起因するところが大きく、たとえば最大船型30000 G.T.、 $\sigma_{\omega}$  が0.25の下で  $\mu_{\omega}$  が1.4～1.7の範囲で変化しても規制にかかる船舶の総隻数に占める比率は約0.6%増加するにすぎないのに対し、 $\mu_{\omega}$  が1.6のもとで  $\sigma_{\omega}$  が0.15から0.35になると規制にかかる船舶の構成比率は2.0%も増加する。このことから、現状の  $\mu_{\omega}$ 、 $\sigma_{\omega}$  のもとでは特に  $\sigma_{\omega}$  が大きい航路で最大船型規制を課することの有効性が理解される。

次に、Case 2の結果をみよう。本結果をみる限りでは最大船型規制はかえって逆効果となることがわかる。これは、大型船が航行しないことによる衝突確率の減少効果より交通量増加による衝突確率の増大効果が大きいためである。ただ、現状の航路は水深の面で大型船舶の航行が制約されていると考えられるため、本結果から逆に、航路浚渫による航行制約の緩和がもたらす衝突確率の減少の程度を推定する



ことが可能である。

なお、ここで述べた最大船型規制の効果や、先に述べた $\sigma_w$ を小さくすることの効果から、航行速力の小さい小型船舶とそれ以外の船舶とを分離し、新たに通行帯を設置したり小型船舶が航路側端を航行することを推奨することも、航行安全性を向上させる施策の1つとして検討されるべき余地が生じてくる。

#### 6-4 結 語

航路計画において航路の評価を行う際、交通事故的海難に対する航行安全性は航路の混雑度を表す一つの指標とすることができる。ある特性を有する航路で、交通量が增大するほど安全性は低下し、逆に安全性を一定の水準以上に保つためには交通量に上限を設ける必要がある。すなわち、航路の交通容量は安全性の面からも規定される。

しかしながら、モデルの特性や操作性の点から、航行安全性が航路計画の計画変数と十分詳細に対応づけられていたわけではなかった。本研究はこの点に留意して第3章で開発したモデルを用い、特に、航路整備と航行規制が航行安

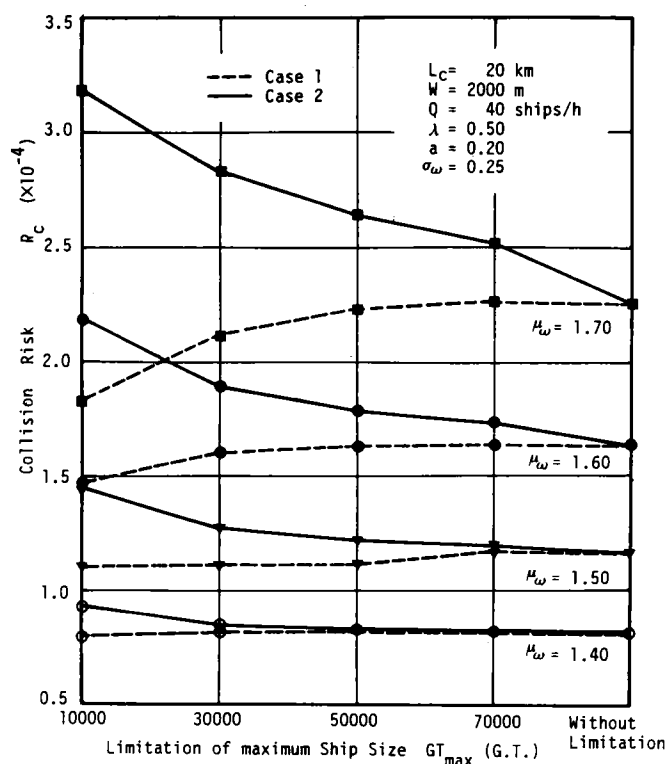


図6-16 最大船型規制効果と平均船型との関係

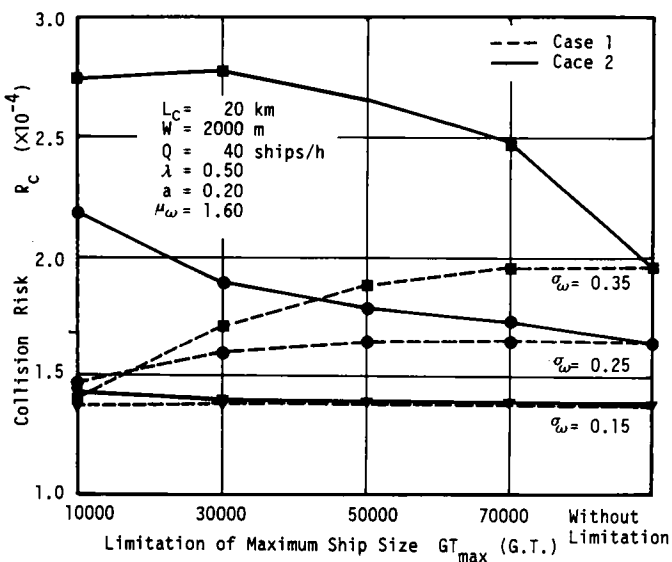


図6-17 最大船型の規制効果と船型構成のばらつきとの関係

全性の向上にいかにか寄与するかに着目して解析を行なったものである。得られた主たる結果を以下に示す。

- (1) 衝突確率は、航路の単位時間交通量の冪乗にほぼ比例する。その指数は航路幅に依存しない一定値であり、交通量が1.5倍になると衝突確率は1.6～1.75倍に、交通量が2倍になると衝突確率は2.2～2.7倍となる。
- (2) 衝突確率は、船舶交通流を構成する船舶の船型分布の対数平均および対数標準偏差の冪乗にほぼ比例する。
- (3) 方向別交通量比ならびに航路境界条件と衝突確率は密接な関係にあり、方向別交通量比の変化が衝突確率に与える影響は一概に規定できない。方向別交通量比が0.5に近い場合、航路中央分離表示を設置することにより衝突確率は著しく小さくなる。
- (4) 衝突確率は航路幅の冪乗にも比例する。従って航路の拡幅は衝突確率を減少させ、たとえば、航路幅を2000mから3000mにすると、交通量が50%増加しても現在と同程度の航行安全性を確保できる。
- (5) 一方向の交通量が他方向の交通量に比べて卓越する場合( $\lambda > 0.5$ )その比率に応じて中央分離表示を變移させることが衝突確率を減少せううえで有効となる。この効果は、航路側方に航行余裕水域を有する航路で特に顕著となる。
- (6) 航行船舶に最高速度制限を課することは衝突確率を小さくする効果があるが、制限値を10ノット以下に設定することはかえって逆効果を招く。船型構成分布のばらつきが大きい航路ほど、この制限は効果的である。
- (7) 最大船型の規制も最高速度制限と同じく、船型構成分布のばらつきが大きい航路ほど有効となる。ただし、これは最大船型を越える船舶の分担している輸送量が、他航路ないしは他の輸送機関に転換すると仮定した場合に限る。この輸送量を航行可能船舶が分担すると仮定した場合は交通量増大効果の方が卓越し、かえって衝突確率は大きくなる。
- (8) 航路浚渫により大型船の航行を可能とし、これが結果として交通量を少なくするならば、衝突確率は減少する。

以上の解析を通じて、衝突確率は種々の特性と密接な関連を有し、ある施策が有効か否かをそのみでは一概に論じられない場合も少なくないことが明らかとなった。したがって、今後は航路整備や航行規制を単独で実施することにこだわることなく、これらを適切に組み合わせ、いかにして効果的なものとするかの選択が重要となってくる。

また、以上の結果は、同時に、航路施設計画画面からの航路の改良効果と航路利用・管理計画画面からの航路の改良効果を統一的に評価しうる評価指標として、船舶衝突確率が有用であることを明らかにするものでもある。

これまでに提案されてきた航路計画の評価指標としては、先に述べたものの他にも待ち時間<sup>10)</sup>や安全係数<sup>11)</sup>が用いられている。これらの指標に加え、本モデルで提案したような安全性を示す指標も同時に航路の評価に用いることができる。今後、これらの指標間の関係を明らかにし、総合的な航路計画に用いられるようにする必要がある。

## 参考文献

- 1) 黒田勝彦・喜多秀行：通行船舶制限が海上衝突事故率に与える影響，第3回土木計画学研究発表会講演集，pp.111～117，1981
- 2) 黒田勝彦・喜多秀行：OSHCOP－モデルによる航路整備と航行規制効果の検討，土木学会論文報告集，No.343，pp.111～119，1984
- 3) 運輸省第三港湾建設局：大阪湾船舶避航確率調査報告書，1981
- 4) 原潔・井上欣三：航跡データの操船への応用，航海，No.80，1984
- 5) 井上欣三：直線航路における航跡分布のモデル化と航路分離に関する一考察，日本航海学会論文集，No.58，pp.103～115，1977
- 6) VLCC研究会：VLCCに関する十章，成山堂，p.43，1977
- 7) 運輸省第二港湾建設局・日本海難防止協会：東京湾船舶航行実態調査報告書，p.73，1976
- 8) G. R. G. Lewiss : The Risk of a Ship Encounter Leading to a Collision, J. of Navigation, Vol.31, No.3, pp.384～407, 1978
- 9) 藤井弥平：船の衝突直径と衝突発生率，日本航海学会論文集，No.42，pp.1～8，1969
- 10) 奥山育英ほか：輸送ネットワークの評価シミュレーションの拡張，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.167～168，1977
- 11) E. Goodwin and R. B. Richardson : Strategies for Marine Traffic, J. of Navigation, Vol.33, No.1, pp.40～48, 1980

## 第7章 航路における船舶衝突事故損失の評価\*

### 7-1 概 説

衝突事故がもたらす損失は船主や荷主のみならず、環境の汚染や交通機能の阻害を通じて極めて広範囲にわたり、その損害額も予想を越えるものがある。航路における航行安全性の確保の必要性が叫ばれて久しいが、航路計画面から十分な対策がとられているかといえ、必ずしもそうではない。その理由の1つとして、どの程度までの対策を講ずることが望ましいかについての基準が明確でなかったことが指摘される。そして、このことは主として、航行安全対策がもたらす便益、すなわち低減することが可能な衝突事故損失を把握することが困難であったことに起因している。

第5章で述べたように、本研究で提案する航路計画の方法論はリスク・費用・便益法に基づくものであるため、リスクとしての衝突事故危険度を貨幣タームに換算する必要がある。このことは、迅速性や快適性といった航路のサービス水準を規定する他の要素と衝突事故危険度を比較するためにも有用である。

ところで、船舶の運航に直接携わる海事関係者の中には「安全性はお金では測れない。ましてやお金には代えられない」との意向も見られるようである。しかしながら、「利潤とは危険負担に対する報酬である」とのKnight<sup>2)</sup>の言葉を持ち出すまでもなく、貨物を輸送することによる利潤が事故に遭遇する危険よりも大きいと判断するからこそ彼らは航海を行うのであり、暗黙裏に両者を比較しているのである。また、全ての船舶が海上保険に加入している事実を考えれば、船舶運航者は期待金額を計算していることにもなる。以上のことから、本研究では、衝突事故危険度の尺度として事故によりもたらされる期待損害額を採用する。ただし、ここで注意すべきことは、期待損害額の単位を何にとるかである。本研究は、衝突事故危険度を減少させるための投資の効果を、投資額とその投資により減少する衝突事故危険度の両者から明らかにし、航路計画の基礎情報とすることを目的としており、その際、リスクの減少分を年間期待損害額の減少分として測定しようとしている。しかるに、年間期待損害額は年間トリップ数や1トリップ当たりの事故確率によっても異なることから、まず1件当たりの事故損害額を明らかにし、これに1トリップ当たりの事故確率と年間トリップ数を乗じることにより、年間期待損害額を算出すべきと考えている。さらに、1件当たりの事故損害額は衝突した船舶双方の船型により大きく異なるものと推測され、当該航路の船型構成いかにによって船型対別衝突確率もまた大きく変わる。それゆえ、事故損害額としては、これまでのように個々の衝突船舶の船型によって整理した船型別期待損害額ではなく、衝突した船舶双方の船型の組み合わせによって整理した船型対別期待損害額を知る必要がある。一方、第3章および第6章で示したようにOSHICOPモデルは船型対別にも衝突事故確率を推定でき

---

\* 本章の一部は文献1)として発表している。

るように構成されている。したがって、以下で求めるべき損害額の単位は「事故 1 件あたりの期待損害額」となる。

以上、本章で算定すべき衝突事故損失の概念が明らかとなった。続く第 2 節では船舶の衝突事故を取り扱った従来の研究を紹介する。さらに、衝突事故損害額を構成する費目を第 3 節で抽出し、第 4 節で海難調査データに基づく損害額の算定を行う。

## 7-2 事故損害額の推定に関する従来の研究

海上交通における事故損害額の推定に関する研究はそれ自体あまり見当たらないのが実状である。これは、事故の全体的な傾向よりも個々の事故の特殊性にまず目が向けられがちであったこと、および、海上交通における事故の問題を費用便益分析の観点から取り扱う必要性がさほど重要視されていなかったためと思われる。

O'Rathaille and Wiedemann<sup>3)</sup>は、海上交通管理システム導入の是非を検討する際に、船体や積荷、人命、環境汚染といった海上事故による損失とシステム導入に要する費用とを比較する必要があるとの認識のもとに、重大損傷を伴った衝突と乗り揚げ事故のデータを用いて、油汚染の社会的費用と海上における死亡のコストを推定している。しかしながら用いたデータ数が少ないことから、提示されたものは見積もるべき損害額の下限值であり、交通管理システム導入に伴う費用と便益の適切な経済的評価を行なうことの必要性を主張するに留まっている。

一方、Giziakis<sup>4)</sup>は、1975 年から 1978 年までの 4 年間にわたる Lloyds Casualty Returns と Liverpool Underwriters Assosiation の資料から、火災・衝突・乗り揚げ・浸水などの事故種類別に船体・積荷・人命に関する損害額をかなり詳細に整理しているが、船型別の対応づけがなされていないため、本研究の目的に沿うものとはなっていない。

藤井<sup>5)</sup>は船と船との衝突に重点を置いて解析を行っている。その際、船型対別の損害率なる概念を新たに導入し、既往の事故データより実験式を導き出している。この概念は船型対別損害額の推定に非常に有用なものとなるが、ただ損害率算定の際に船型別要救助率を考慮せず平均的な要救助率を用いているため、大型船になるほど損害率を過大推定するという問題点を有する。

さらに、船型別要救助率の実績値を用いて上述の藤井による結果を再補正した稲垣<sup>6)</sup>の推定値も、大型船相互間の衝突事故損害額が船価に比してなお若干大きいようである。これは、推定の基礎となっている藤井の研究で用いられている海難調査データが 1969～71 年のものであるため、船型構成に占める大型船の比率が現在のように小さくなく、したがって大型船相互の衝突そのものが数少ないものであったことにも起因すると考えられる。

以上、既往の研究は、上に述べた問題点の故に、7-1 で述べた航路計画のリスク便益分析に直接

適用することが適当でない。したがって本研究では新たに既往の事故データを収集し、これを解析することによって、船型対別平均損害額を算定することとする。

### 7-3 衝突事故損害額を構成する費用項目

衝突事故がもたらす影響がどのように波及してゆくかを大略的に示したものが図7-1である。このように、ある原因から生ずる結果を順にたどることによって損害の種類、帰属主体、さらには損害の程度を網羅的に列举することが、広範囲にわたる多様な影響の全貌を把握する際には有効な方法となる。本来はしかる後、列举された個々の損害項目とその損害が生起する確率を対応づけ、その期待値をとることによって、当該種類の事故がもたらす期待損害額を算定すべきであるが、こと海難に関しては、サンプルサイズを規定する事故件数と比べて損害項目の数が多いため、上述の方法を可能とするだけの十分な生起確率を算定することは實際上極めて困難である。これは、そもそも衝突が稀現象であることに加えて損害の波及が広範囲にわたり、かつ、その程度が水域利用状況や海象など事故をとりまく環境条件により大きく異なることに起因している。そこで本研究では個々の項目ごとに損害額を算定することを行わず、図7-1に示した損害項目を、その帰属先に着目することにより表7-1に示すごとく分類

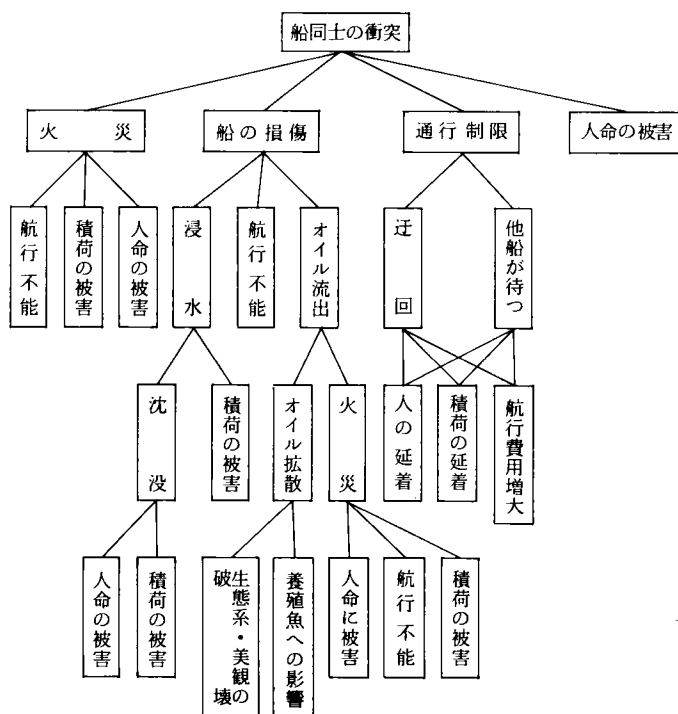


図7-1 船舶の衝突がもたらす影響の波及

表7-1 被害項目の分類と列挙

被害の種類	具体的な被害項目
事故船自体にかかわる被害 (人や積荷も含めて)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人の延着</li> <li>・積荷の被害</li> <li>・人命の被害</li> <li>・船体の引き出し費用</li> <li>・船自体の損傷</li> <li>・船員送還、交替費用</li> <li>・救助作業に伴う費用</li> <li>・船舶の財物に関する責任</li> </ul> etc.
影響を被る他の船舶の被害額 (違約金+船費の増大+新たな荷役の手配にかかる費用)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人、積荷の延着</li> <li>・迂回による船費</li> <li>・新たな荷役による費用</li> <li>・離路のための余分の費用</li> </ul> etc.
環境対策費（事故処理費用）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・火災の消火費用</li> <li>・水質汚濁過怠金</li> <li>・美観の破壊による被害</li> <li>・油その他による汚濁水面清掃費用</li> <li>・日常生活への不都合</li> <li>・生態系の破壊による人間生活への被害（漁民、一般人）</li> <li>・海産物、漁網、定着物、可動物等に加えた被害</li> </ul> etc.
経済的活動に波及する種々の分野の被害	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原材料の在庫不足がもたらす費用</li> <li>・製品の保管費用</li> </ul> etc.

し、それぞれの分類に含まれる損害の総額を知ることにより、事故による損害額を把握しようと試みる。

表7-1のうち、事故船自体にかかわる損害に関しては海難調査票を、環境対策費に関してはP.I. 保険(Protection & Indemnity Insurance: 船主責任相互保険)の支払い実績を調べるなどによって、ほぼ該当する各項目に対応する損害額を知ることができる。しかし、P.I. 保険の最近の支払い実績資料を収集し、100件程度のデータを抽出して予備的な検討を行ったところ、環境対策費の額は極めて広範囲にわたり、とりわけ周辺水域の利用状況（主に、エビなどの高級魚の養殖場の存在）に大きく依存していることが明らかとなっている。そのため、何をもって平均的な環境対策費とみなすかについての議論をさらに行うことが必要であり、また、水域利用状況をいくつかの要因で特徴づけようとしても、収集可能なサンプル数とそれに規定される推定精度の面からの制約もあるため、これについては今後の研究に待つところが多い。あるいは、このような統計的な整理結果を用いるよりも、計画対象とする航路の利用実態に類似した水域におけるデータを用いてそのつと詳細な検討を加える方が实际的であるかもしれない。したがって、環境対策費に関しては本研究で特に解析を加えることをせず、今後の検討にゆだねることとする。

一方、事故による航行制限などによって他の船が遅延を余儀なくされ、これがために新たに発生する損失については、日本海中部地震発生時における秋田港の港湾機能停止影響調査資料<sup>7)</sup>を検討した結果、特殊な例を除いて数日程度までの入出荷の遅れはほとんど在庫でカバーすることが可能であることがわかっていること、ならびに運送契約には通例、荒天などに起因する相当程度の遅れがあらかじめ見込ま

れていること<sup>8)</sup>などから、事故船舶自体や環境に関する損害に比べて影響は小さいものと判断し、今回は測定の対象に含めないこととする。

以上の検討より、本研究では事故船舶の船体と積荷の損傷により生ずる直接的な損害をもって、衝突がもたらす損失とみなすこととする。これは、衝突事故損失を実際より若干少なく見積もる結果となるため、航路整備の代替案選択に際しては、整備水準を低めに設定する方向にはたらくことに注意を払っておく必要がある。

さて、衝突事故損害額の大きさに影響する要因として船型、船価、船齢、船の用途、船や積荷の損傷程度、積荷の種類、積載率、船の材質、などが考えられる。

上記のうち本研究では衝突をおこした双方の船舶の船型の組合せのみを明示的に扱い、その他は平均的に扱う。これは損害額に対する船型対の寄与率が高いこと、航路整備と航行規制の導入により、船型対別の事故確率が大きく変化することが予想されること、および船価、船齢などは、短期的に変動する性質のものではなく、操作が可能なわけでもないといった理由によるものである。

7-4 事故船舶に係わる直接損害の推定

算定のための基礎資料として、昭和56年1月から昭和59年12月までの海上保安庁海難調査データ<sup>9)</sup>を収集した。本データには、事故船舶の諸元と事故を取り巻く諸条件に加えて船体と積荷に関する損害見積り額が記載され、現在のところ本研究で用いる資料としては最も適切なものと思われる。

まず、総トン数5トン以上の船舶のデータの中から、衝突対象物が（岸壁や浮標などでなく）船舶であるもののみを抽出した。これは、総トン数5トン未満の船舶のほとんどが漁船とプレジャーボートであり、本研究で対象とする航路には少ないためである。次いで、事故発生時刻や発生水域ならびに相手船用途などを手掛りとして各船舶に衝突した相手船を捜し出し、対応づけを行った。対応づけが可能となった衝突事故のうち、双方の船舶の総トン数とも5トン以上である衝突事故は950件である。表7-

表 7-2 解析に用いた衝突事故のサンプル数

Opponent Ship's Size $k'$ (GT) \ Concerned Ship's Size $k$ (GT)	~3000 ( $k'=5$ )	3000~500 ( $k'=4$ )	500~100 ( $k'=3$ )	100~20 ( $k'=2$ )	20~5 ( $k'=1$ )
5~20 ( $k=1$ )	35	36	90	29	42
20~100 ( $k=2$ )	38	29	66	49	
100~500 ( $k=3$ )	117	119	140		
500~3000 ( $k=4$ )	59	35			
3000~ ( $k=5$ )	66				



2に船型対ごとのサンプル数を示す。事故1件ごとの直接損害額は、先に述べたように、双方の船舶の船体損害見積り額と積荷損害見積り額の和として求めた。衝突事故1件当たり船体と積荷の損害額の単純平均は、それぞれ約2890万円と約1020万円となり、全ての船型についての平均的な直接損害額は約3900万円と推定される。船型対別の平均的な直接損害額を図示したものが図7-2である。

### 7-5 結 語

船舶の衝突事故は人命の損失以外にも多大な経済的損失をもたらす。この損失を可能な限り小さなものとするを旨として、これまで種々の航路整備や航行規制が行な

われてきた。その際、損失の減少により得られるものが損失の大きさをコントロールする費用より大きいことが計画の必要条件の1つとなり、計画案がこの条件を満たすものであるか否かを検討しておくことが要請される。

これを可能とするための基礎として、本章では衝突事故がもたらす経済的損失の算定を行なった。得られた結果は以下のようである。

- (1) 算定すべき事故損失の概念に検討を加え、第5章で提示した計画方法論に沿いうる衝突事故危険度を表す尺度として期待損害額が適切なものであることを示した。
- (2) 衝突事故損失を構成する費用項目を列挙し、船体および積荷の損傷による損害と海洋汚染による損害が主たるものとなることを指摘した。このうち、後者については損害額が事故発生水域の特性に大きく依存するため、計画対象航路の特性に応じてそのつど予想される損害額を推定することが実際のであり、前者については航路ごとの船型構成の違いと事故率推定モデルの特徴を考慮して双方の船舶の船型の組み合わせごとに整理すべきであることを述べた。
- (3) 海上保安庁による海難調査データを収集・整理することにより、船型対別直接損害額を算定した。これを全船型の平均値でみた場合、衝突事故1件当たり、平均的に約2890万円の船体損害と約1020万円の積荷損害、合計約3900万円の損害が生じていることが明らかになった。

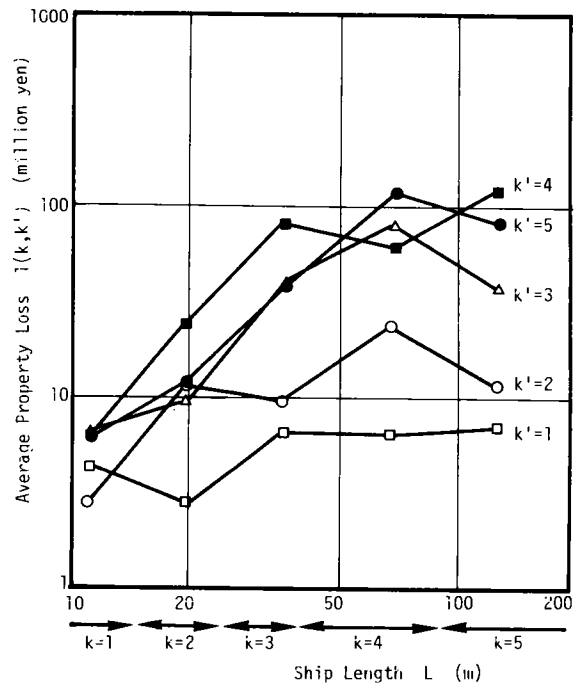


図7-2 船型対別平均損害額

## 参考文献

- 1) 喜多・黒田・稲垣：海上交通を対象としたリスク分析に関する研究，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第4部， pp.123 ～ 124, 1984
- 2) F. Knight : Risk, Uncertainty, and Profit, University of Chicago Press, 1971
- 3) M. O'Rathaille & P. Wiedemann : The Social Cost of Marine Accidents and Marine Traffic Management Systems, Proc. of the Int. Nav. Cong., pp.272 ～ 290, 1979
- 4) K. Giziakis : Economic Aspects of Marine Casualties. J. of Nav., Vol. 35, No 3, pp.466 ～ 478, 1982
- 5) 藤井弥平：海上交通事故の研究—V—損害の程度—，日本航海学会論文集，No 54, pp.47 ～ 54, 1976
- 6) 稲垣勝伸：海上交通を対象としたリスク・便益分析に関する基礎的研究，京都大学卒業論文， 1984
- 7) 米沢 朗：日本海中部地震による秋田港の貨物流動の変化とその経済的影響について，港湾， Vol. 60, No 11, pp.33 ～ 38, 1983 および，運輸省港湾技術研究所設計基準部計画基準研究室調べ
- 8) 岡庭 博：新訂 海運の概要，成山堂， p.99, 1979
- 9) 海上保安庁警備救難部航行安全課調べ

## 第8章 航行シミュレーション・モデルを用いた 航路における混雑費用の評価\*

### 8-1 概 説

航路における交通混雑は、これまでに述べた航行安全性の低下による事故損失の増加以外にも、さまざまな損失をもたらす。この損失は、迅速性・経済性・快適性の低下によるものなど数多くの要素から構成されるが、なかでも遅延により新たに生じる損失がその大部分を占めると考えられる。ところで、航行安全性の向上を目指して行われる航路整備は、同時に交通混雑をも緩和し、混雑に伴う遅延時間も短縮することが期待される。遅延時間の短縮による損失低減効果は船舶1隻のみでは僅かなものでないが、当該航路を航行する船舶全体では無視しえないほど大きなものになると思われる。そこで、事故損失と同様に航路整備計画策定上の基本となる構成要素として、遅延によりもたらされる損失についても検討しておくことが要請される。

ここで、混雑による遅延に伴って新たに発生する費用を“混雑費用”と呼ぶことにする。さて、後程述べるが、半日や1日でなく、数分から数十分程度の遅延によって発生する混雑費用は遅延時間の長さに応じて増加するものが多い。そのため、以下では混雑費用を単位遅延時間当りの損失（費用）と総遅延時間の積によって算定しうるものとする。これは、航路計画の操作変数を変更することによる遅延時間の変化が混雑費用の変化に直接反映されると見なすことを意味している。そこで、第3節では、まず航路整備がもたらす混雑緩和の効果を定量化するため、航路諸元と交通流特性から航路の通過に要する航行時間を推定するシミュレーション・モデルを開発する。また、第4節では船舶の単位時間当りの混雑費用を算定する考え方を示す。この両者を知ることによって航路整備によりもたらされる混雑費用の低減、すなわち利用者便益の増加分を知ることができる。

### 8-2 航路における混雑費用を扱った従来の研究

航路における混雑費用を直接の研究対象とした研究は著者の知る限りでは見当たらない。概説でも述べたように、本研究では、混雑によりもたらされる遅延時間と単位遅延時間当りの費用増分とから混雑費用を算定する方法をとる。そこで、以下では航行船舶の遅延時間（ないしは航行時間）の推定と、時間損失の定量化のそれぞれに関する既往の研究を概観する。

#### (1) 遅延時間の推定に関する既往の研究

航路上で混雑によりもたらされる船舶の遅延時間を推定する研究は、解析的方法によるものとシミュ

---

\*本章の一部は文献1)～3)として発表している。

レーションによるものの2種類に大別される。

解析的方法に分類されるものとしては以下のものがある。

① 山田・田中の研究<sup>4)</sup>

交通流が定常な状態（船型構成と、船舶密度がほぼ一定で、単位時間あたり追い越し、回避等の動作回数もほぼ一定の状態）にある場合を想定し、これらの船舶が他船や障害物等によって影響を受ける強度割合を超幾何分布で近似して船舶の通過所要時間を解析的に求める方法を提案したものである。この方法では、速度の期待値や通過所要時間の期待値などが船舶密度の関数として得られるため、船型構成が変化しないならば異なった交通量に対する通過所要時間を推定することができる。しかしながら、方法の提示に留まり、現象説明力についての検証がなされないため、その妥当性については不明である。

② 喜多・長尾の研究<sup>5)</sup>

輻輳状態にある交通流を対象として、船舶の遅れを最低速船への追従によるものと、混雑のため最低速船が自由速度で航行できないことによるものの和にとらえ、後者を集団到着待ち行列系の待ち時間に対応づけることによってこれを推定しようとするものである。輻輳の程度が高い場合にはシミュレーション結果と比較的良好な対応を見せているが、交通量が少なくなるにつれてやや過大推定となる。

シミュレーションによる方法はさらにマクロ・シミュレーションとマイクロ・シミュレーションに分けられる。

マクロ・シミュレーションは、海域をいくつかのブロックに分け、個々のブロックに通過所要時間とブロック内に同時に存在することが許される隻数を与えることによって、船舶が一連のブロック上をつぎつぎに通航してゆく挙動を記述するシミュレーション・モデルである。代表的なものには以下の研究がある。

① 木俣・石崎の研究<sup>6)</sup>

ブロックとレーンに分割されたモデル航路を、前方と側方の避航領域を確保しつつ、必要に応じてレーンを変更しながら前方のブロックへと船舶を進めて行く、Time Slicing 方式と Event Sequential 方式の複合型としてのシミュレーション・モデルである。システムの状態を記述する特性値として、期待通航所要時間（自由航行に要する時間）からの遅れを採用している。モデルの妥当性については特に言及されていない。

② 奥山の研究<sup>7)</sup>

船舶の交通路をリンクとノードの連なりからなるネットワークとして表現する。各々のリンクとノードに、そこを航行する船舶のタイプに応じた通過時間の分布とそのリンクもしくはノード

上に存在し得る船舶の最大隻数を与えておくことにより、経路毎に与えられている確率分布に従って発生する船舶が、ノードからリンクへ、リンクからノードへと次々に経路上を進んで行く。モデルの妥当性については、シミュレーション結果において待った船の割合が同一海域における実態観測結果から得られる避航船舶の割合にほぼ一致することをもって、その根拠としている。通過に要する時間の自由航行時間からの遅れは各リンク・ノードでの待ち時間の和として与えられる。

一方、マイクロ・シミュレーションは、あらかじめ与えられているそれぞれの船舶の操縦性能と運航判断基準に従って、変針や増減速を行なわせながら船舶を航行させることにより、海上交通を忠実に再現しようとするシミュレーション・モデルである。代表的なものには以下の研究がある。

① 杉崎ほかの研究<sup>8)</sup>

船舶の航行速度に応じて変化する避航領域と運航者から抽出した運航基準に基づいて、Time Slicing 方式により船舶の動きをシミュレートしている。船体運動は野本の一次系運動方程式を基礎としている。モデルの妥当性に関しては検証されていない。

② 山田・田中の研究<sup>9)</sup>

従来の大型電子計算機を利用したマイクロ・シミュレーションモデルにおいて操船判断を行なう部分と交通流制御を行なう部分とを実際の人間オペレータに置き換えた、いわば人間—機械系を構成要素とする制御システムで、これらの人間オペレータに、周辺水域の状況や交通制御などに関する情報を与え、逆にオペレータから選択された操船レベルに関する情報を受け取るというやりとりを繰り返してシミュレーションを進めてゆくものである。

③ 海上保安大学校海上交通工学研究会の研究<sup>10)</sup>

避航開始領域と避航領域の2つの概念を用いて避航の必要性の判定とその時機の設定を行い、状況に応じて予め設定された避航操船パターンの中から1つを選んで避航を行わせつつシミュレーションを進めるモデルである。陸岸に対する認識に関してもモデルに組み込まれており、得られた航跡と実際の航跡とを対照することによって現象説明力を検証している。

(2) 時間損失の定量化に関する既往の研究

航路上での混雑に起因する遅延損失を定量的に算定しようとした研究はまだない。この理由は、航路における交通混雑がかつてはさほど顕著ではなかったことに加え、船舶1隻ごとに見た場合の遅延時間は僅かなものに過ぎず、航路を通過した後に若干のスピードアップをする事によって容易に回復できるものとのイメージが強かったためかと思われる。ところで、現在のような整備が進められる以前の港湾ではバース待ちによる船混みが大きな問題となっており、最も効率の良いバース数を算定しようとする研究が盛んに行われていた。そして、この研究の一環として船舶に待ちが発生した際の損失を算定する

試みが見られる。<sup>11)～13)</sup> しかしながら、航行時と停泊時では必要となる費用に異なる部分があるため、そのまま用いることができない。

一方、海運経済の立場から、船舶の保有ならびに航海に要する費用に関する検討もなされている。<sup>14), 15)</sup> しかるに、この方面からのアプローチでは、ある特定の船型の船舶を取り上げて具体的に積算していることが多いため、本研究の目的に即した結果は必ずしも得られない。

これとは別に、長尾ほか<sup>16)</sup>は荒天のため港外避泊を強いられる船舶の避泊費用を算定している。ここでは、避泊費用が船型別に求められ、さらに避泊費用を構成する個々の費目ごとにその算定式が示されているため、航路上における遅延によりもたらされる時間損失に関係する費目を分離することが可能である。

### 8-3 本研究で用いる航行シミュレーション・モデルの概要

#### 8-3-1 本モデルの考え方と基本構造

航行シミュレーション・モデルに限らず、一般に、モデルは、その目的とするところを最もよく達成するように組み入れる要因を取捨選択し、検討の対象とする挙動の記述に過不足が生じないように構築される。したがって、異なる目的に転用する際に、効率性や現象記述の精度といった面で適切さに欠ける部分が生ずる場合がある。前節で紹介した既往のシミュレーション・モデルは、航行ルートが複雑に錯綜している水域において局所的な輻輳度を求めることを目的とするもの、あるいは、大角度転舵や逆転制動を必要とする危険な状態が航行中に生じる頻度を求めることを目的とするものなど、そのほとんどが本章で要請されている“航路特性や交通特性の変化に伴う航路通航所要時間（航行時間）の変動を求める”という目的とは異なるものを第一義的な目的として構築されたものである。このため、本章の目的に照らすと、検討すべき航路特性や交通特性の変化が結果に十分反映されてこないといった問題点、あるいは詳細な感度分析を行うことが実際上困難となるほどの長大な実行時間を要するといった問題点が生じてくる。

このような背景から、以下に述べるシミュレーション・モデルは対象とする航路を通航するのに要する航行時間を簡便に推定することを目指して開発された。モデルの基本的な考え方はマイクロ・シミュレーションに分類されるが、これまでのマイクロ・シミュレーション・モデルと大きく異なる点は、従来のモデルで長い演算時間を必要とする最大の原因であった操船判断のプロセスと船体運動の記述を、先に述べた目的にそぐわないという意味での支障が生じない範囲で大幅に簡略化したことである。すなわち、“平均的な避航挙動の結果として生成される「避航領域」の中に船舶が進入するか否か”のみをもって避航の判断を下すものとした。また、避航時の船体運動も平均的な変針避航を行った際の船体運動に概ね対応しているものの瞬間的に回頭を完了し、回頭と回頭の間は直進するという大胆な単純化を行なっ

ている。しかしこのような簡略化を行なったにもかかわらず、航行時間に関してはほぼ満足な現象説明力を備えていることが後に示される。

このモデルは、図8-1のフローチャートからも理解されるように、ARRIVE、ENTER、SEARCH、STATUSと名づけられた4つの主要な副プログラムと、これらを統合する主プログラムから構成されている。このうちARRIVEは航路入口へ到着する船舶を所与の交通特性に応じてシミュレータの中に発生する機能、ENTERは到着した船舶をある規約に従って航路内へと進入させる機能、SEARCHは進入した船舶の航路内における時々刻々の挙動を決定する機能を有する。これら3つの副プログラムにより船舶の挙動はシミュレートできるのであるが、さらに副プログラムSTATUSにおいて種々の識別番号を各船舶に付与し、航路に進入させた全船舶の航行位置を探索・記録することによって、SEARCHとENTERの効率化を図る。記録された全船舶の航行位置に関するデータはシミュレーションが所定の時間実行されて終了した後、付加された副プログラムTOUKEIから必要に応じて参照され、個々の船舶ごとの航行時間や遅延時間、あるいはその平均値が計算される。また、平均避航回数や平均追従時間比といった混雑の程度を記述する他の指標をも出力することが可能である。

シミュレーションは定間隔時間制御方式（Time Slicing方式）をとり、航路は任意の形状のものを設定しうる。航行船舶の交通特性としては、交通量ならびに船型構成や速度構成などを特徴づけるパラメータを操作することができるが、航過方向は現在のところ一方のみであり、二方向流や横断交通流を扱いうるモデルにまでは拡張していない。

シミュレーションを進めてゆく最小の時間の単位を1クロックタイムと呼ぶことにする。クロックタイムはこれまで、多くの場合、挙動記述の精度（クロックタイムが短いほど詳細な記述が可能となる）とシミュレーションの計算時間（クロックタイムが長いほど同一シミュレーションの計算時間が短縮される）とのトレード・オフを最も良く満足する時間間隔として設定されてきたが、本シミュレーション・モデルは簡略化の結果、計算時間にさほど注意を払う必要がなくなったため、ここでは実際の操船状況を念頭において30秒とする。また、航路形状も一律な直線上航路を想定し、航路幅と航路延長のみを操作変数とする。

なお、シミュレーション開始時には航路内には船舶は存在せず、開始後に到着した船舶が次々と航路上を進んで行くことによって徐々に航路が船舶で満たされてゆく。したがって、種々の統計値を得るにあたっては、シミュレーション開始時から交通流が定常状態となるまでの間のデータを捨て去り、定常流が実現した後のデータのみを用いるよう留意した。交通流が定常状態となったか否かは、一定の時間間隔に航路出口に到着する船舶の隻数の変動を見ることにより判別することができる。

### 8-3-2 航路入口への船舶の到着

航路入口へ到着する船舶は、到着時刻とその位置、ならびに当該船舶の船舶諸特性により特徴づけら

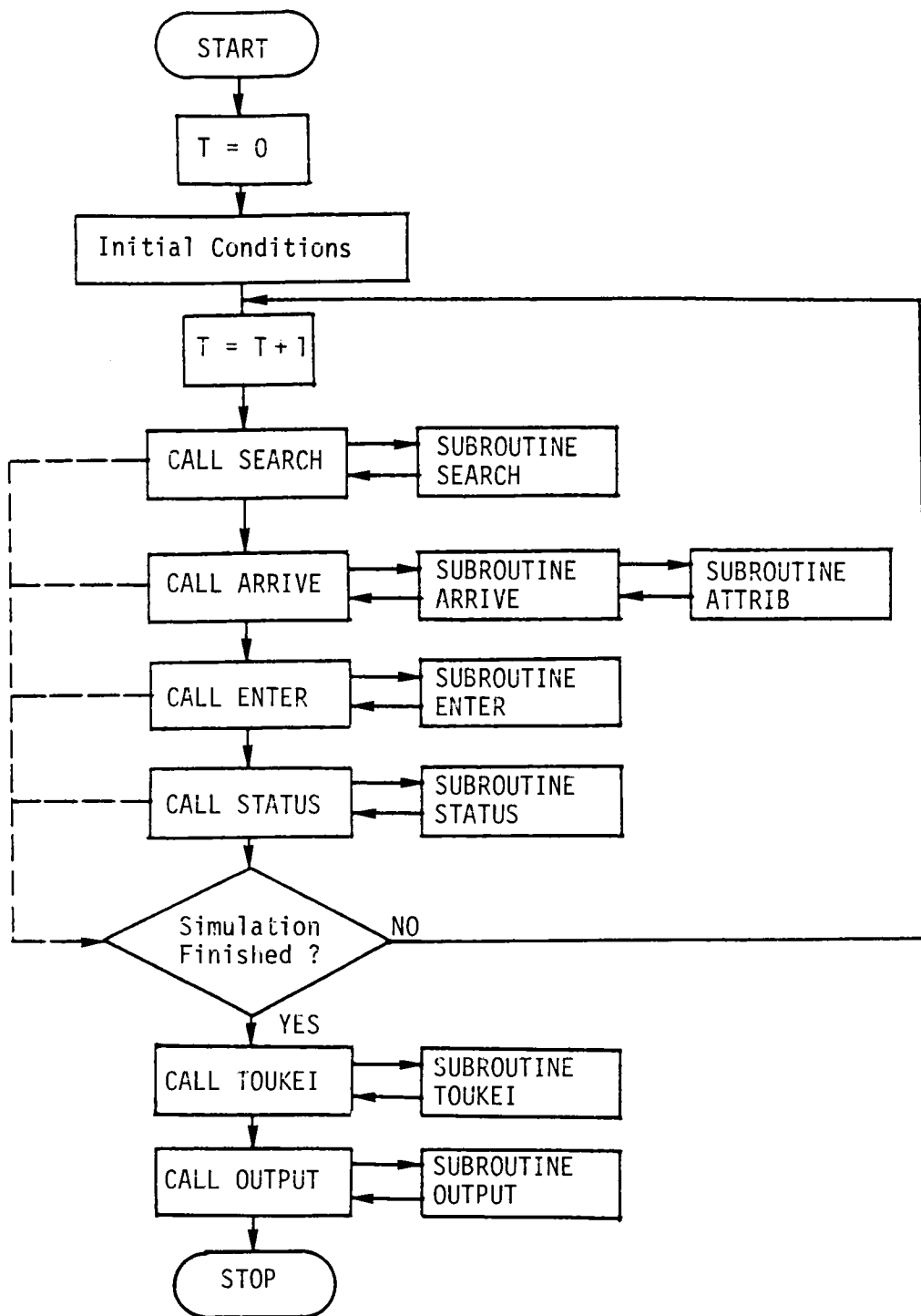


図8-1 遅延時間の推定に用いたシミュレーション・モデルのフロー



れる。第2章で示したように、狭水道等に設置された任意のゲートライン上に単位時間 $\delta t$ の間に到着する船舶の隻数 $n$ は、時間交通量 $Q$ を平均値とするポアソン分布、

$$\phi(n) = \frac{(Q\delta t)^n}{n!} e^{-Q\delta t} \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

に従う。そこで、時刻 $t = T$ に(8.1)式で与えられる分布に従うポアソン乱数を発生させ、出た数をもって時刻 $T$ から $T + \delta t$ までの1クロックタイムの間に到着する船舶の隻数とする。これらは時刻 $t = T$ に同時に航路入口に到着したものとみなされる。

到着時の航路幅方向の航行位置 $x$ は、次式で与えられる正規分布として2-6-2で示した航路幅方向の航行位置分布、

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

$$\sigma_x = -7.17 + 0.105W + 2.168Q_L$$

に従うものとし、到着船舶ごとに正規乱数を発生させて設定する。ここに、 $W$ は航路幅(m)、 $Q_L$ は $L = 35$  mを標準船とし、垂線間長 $L$ の比率で重みづけられた $L$ 換算交通量(隻/時)である。

また、船舶長 $L_k$ と航行速度 $V_k$ の分布は2-6で示したように、

$$\phi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\omega} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\omega - \mu_\omega}{\sigma_\omega} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (8.3)$$

$$\omega = \log_{10} l_k$$

$$\phi(V_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{V_k}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{V_k - \mu_{V_k}}{\sigma_{V_k}} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (8.4)$$

$$\mu_{V_k} = 10^{0.29 \log_{10} l_k + 0.52}$$

$$\sigma_{V_k} = 0.2 \mu_{V_k}$$

に従うものとし、個々の船舶ごとにそれぞれ正規乱数を発生させて設定する。

### 8-3-3 航路入口への船舶の進入

本シミュレーションは混雑が生じているような輻輳状態を対象とするため、航路入口に一本の進入待ち行列を設けている。すなわち、すべての到着船舶は一旦この進入待ち行列に加わる。そして、先頭の船舶から航路内に進入可能かどうか判定され、可能であれば待ち行列から離脱して航路に進入するという手続きを想定している。狭水道などに設けられている航路の多くはその入口前面まで比較的広い水域を有しており、船舶はこの水域から航路入口を目指して航行してくる。このとき航路入口付近で他の

船舶と接近する可能性が予想されると、一般には接近することによる危険性を回避し、相互の位置関係の調整を図るためにあらかじめ避航を行うことが見うけられる。この場合、避航は実質的な時間調整に相当すると考えられるので、この状況を待ち行列としてモデル化していることになる。

到着船舶は、到着順にまず進入待ち行列の後尾に加わる。(同時刻に複数の船舶が到着する場合は、便宜上、ARRIVEで発生した順序で加わるものとする)。次いで、待ち行列の先頭の船舶が、到着した航路幅方向の位置に進入可能か否かが判定される。この判定は後に述べる SEARCHにおける航行状態の設定と基本的に同じ内容を有し、航路に進入することが前方を航行する船舶の避航領域に踏み込むことにならないならばそのまま進入し、1クロックタイムの間避航すれば踏み込むことが避けられる状態にあっては避航しながら進入する。また、前方船の避航領域に踏み込むことなしに進入することが不可能な場合には1クロックタイム待つこととし、待ち行列に留まる。同様の検討を2番目以降最後尾の船舶まで順次行なって行くのであるが、航路幅方向の到着位置の関係から、待ち行列中の前方の船舶が航路に進入できないにもかかわらず、より後方の船舶は進入可能となり、先に待ち行列から離脱する場合も生じる。

なお、本モデルでは、すべての到着船舶が一旦待ち行列に加わることにしているが、進入待ち状態の船舶が存在せず、かつ到着時に進入可能な状態であれば即刻待ち行列から離脱するものとしているため、この場合には実質的な待ち時間は発生しない。

#### 8-3-4 航路内における船舶航行挙動

航路内を航行中の船舶は周囲に存在する他船の位置を探索し、次の1クロックタイムの間にとる行動を決定する。取りうる行動は航海速力による直進(自由航行)と左右への変針避航、および先行船と同じ速度で追従する減速避航の3種類である。その決定基準は、1クロックタイム経過後も他船の避航領域に進入することのない場合は直進、そのまま進むと避航領域に侵入してしまうような先行船が存在する場合は変針避航、さらに近傍を航行する他船の避航領域に侵入することなく変針することが不可能な場合は減速というように、避航領域を媒介として順次決定を行う。この際、船舶は航路側方へも逸脱することがないように航行する必要があるため、航路側端を越えるような変針も許されない。

避航領域は、第4章の検討結果に基づいて、楕円の長径 $R_1$ と、短径 $R_2$ の生起確率の $p.d.f$ が近似的に正規分布、

$$\left. \begin{aligned} \phi(R_1) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{R_1}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R_1 - \mu_{R_1}}{\sigma_{R_1}} \right)^2 \right] \\ \mu_{R_1} &= 0.125 L_1 + 2.5 L_2 - 2.6 \\ \sigma_{R_1} &= 0.056 L_1 + 0.5 L_2 - 3.3 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \phi(R_2) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{R_2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R_2 - \mu_{R_2}}{\sigma_{R_2}} \right)^2 \right] \\ \mu_{R_2} &= 0.292 L_1 + 5.83 L_2 - 6.01 \\ \sigma_{R_2} &= 0.13 L_1 + 1.17 L_2 - 7.7 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.5)$$

に従う確率変量として与える。ここに  $L_1, L_2$  は、それぞれ先行船と追い越し船の船舶長である。ただし、大きさが確率論的に定まる避航領域といっても、個々の避航ごとにその実現値が変化するという取り扱いをせず、副プログラムARRIVEで到着船舶を生成した時点で(8.5)式に従う正規乱数を1つ発生してパラメータの値を設定し、以後航路を通過し終えるまで、当該船舶の避航領域の大きさはこのパラメータと避航に関与する双方の船舶の船舶長によって規定されるものとする。

時刻  $T$  から  $T + \delta t$  に移行する際の航行状態の決定は、航路出口に最も近い船舶“1”にまず着目し、これを自由速度で航路と平行に1クロックタイム航行させる。次いで、その次に航路出口に近い船舶“2”を自由速度で同様に航行させた場合、1クロックタイム後の位置  $(x_2, y_2)$  が先行船“1”の避航領域内にあるか否かを、避航領域の径  $R$  と両船の距離  $D$  の大小関係、

$$\left. \begin{aligned} D &> R \quad (\text{直進可能}) \\ D &\leq R \quad (\text{直進不可能}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.6)$$

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$$R = \sqrt{(R_1^2 \cos^2 \psi + R_2^2 \sin^2 \psi)}$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$$

により判断する。ここに  $x_1, y_1$  と  $x_2, y_2$  は航路入口境界線を  $X$  軸、これに垂直で航路中央を通る直線を  $Y$  軸にとったときの船舶“1”と“2”の位置を示す。直進することが不可能な場合は、避航領域に進入してしまう先行船の反対側に角度  $\theta$  だけ変針することを考え、上記と同様の検討を加える。これも不可能の場合は先行船と同じ側への変針を検討する。さらに、これとても不可能な場合は減速して先行船“1”に追従することとし、船“2”に対する航行状態を決定する。そして、この決定に従って1クロックタイムに進みうる距離だけ船を前方に進める。航路出口から3番目以降の船についても、全く同じ探索を全ての先行船に対して行なうことにより順次航行状態を決定し、出口から最も遠い（つまり航路に進入したばかりの）船舶まで1クロックタイム後に到達しうる位置へと船を進ませる。このよう

にして航路内に存在する全船舶に対する検討を終え、航路入口での進入の可否を検討するため、副プログラムARRIVEに作業を移す。そして、ARRIVEでの検討が終わった時点で時刻を1クロックタイム進める。

#### 8-3-5 モデルの現象再現性に関する検討

構築されたシミュレーション・モデルの妥当性はさまざまな観点から検討することができる。しかるに、8-3でも述べたように、モデルは何らかの目的意識の下で作成されるものであるため、その妥当性は、対象とするものの着目している側面の挙動をいかに忠実に記述しえたかにより判定されるべきである。これまで、海上交通のミクロ・シミュレーション・モデルの妥当性を検討するために行われてきた方法の1つは、結果として得られる個々の航跡と実際の航跡とを対比する方法<sup>10)</sup>であるが、本シミュレーション・モデルは混雑に起因する平均的な遅延時間の推定を目的として開発されたものであるため、個々の航跡に関しては必ずしも実航跡と一致するとは限らない。そのため、ここでは航行実態観測調査データから取り出した各船舶の船型、航路入口への到着時刻、および到着時の航行速度と航路幅方向の位置を入力し、出力として得られた各船舶の航行時間を実際の航行時間と比較することにより現象再現性を検討する方法をとった。本シミュレーション・モデルは、直線上の一方航路を対象とするものであるため、比較すべきデータも同様の航路におけるものを用いるべきであるが、この様な条件を満たし、かつ混雑が生じているような航路における観測データが見当たらないため、航行分離がなされている浦賀水道航路の中央部分のデータを用いることにした。検討に用いた航路区間は図8-2に示すとおりであり、航路延長は5km、航路幅は1000mである。

実態観測データ<sup>17)</sup>は正午から翌日正午までの24時間に当該航路を通航した北航船で、総隻数は312隻である(航跡の一例を図3-8に示す)。このうち図8-2に示した区間の入口と出口となるゲートラインA-A'とB-B'をともに横切って航行した船舶229隻に対するゲートラインA-A'上での位置と速度、船型ならびに通過時刻をモデルに入力し、シミュレーションを実行した。その際、観測データは連続した航跡ではなく2分間隔の航行位置を示す離散的な形態であるため、航路進入時の速度は航路入口手前の海域を一定時間内に航行した距離を測定することにより求め、ゲートラインの通過位置と通過時刻は離散データを3次Spline関数で近似し補間値をとることにより求めた。

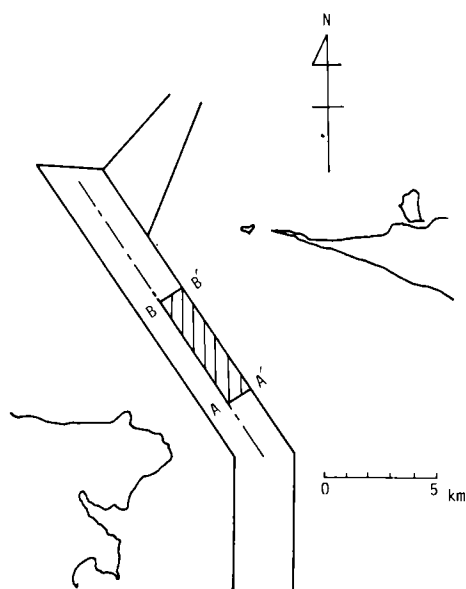


図8-2 検討に用いた航路区間

実際の航行時間はゲートラインA-A'とB-B'の通過時刻の差から計算し、モデルによる推定値は航路入口到着時刻（待ち行列に加わった時刻）と航路通過完了時刻の差として得られる。両者がよく一致しているほど、モデルの現象説明力が高いことになる。ただし、反航船ないしは横切り船の影響を受けていたり、航路進入時に避航の状態であって自由速度で航行していないと見なされる船舶航跡は、モデルの前提条件にそぐわず検証結果を歪める恐れがあるため、実航跡をあらかじめ検討することにより取り除くことにした。図8-4にその結果を示すが、避航を行っていない場合にも船舶の実際の速度は一定ではなくある程度のばらつきが見られることなどを考えると、本シミュレーションは、航行時間に関する限り概ね良好な現象再現性を有するものと見なすことができる。

#### 8-4 混雑に伴う時間的損失の費用換算

リスク・費用・便益分析に基づいて航路計画を策定・評価するためには、前章で検討した船舶の事故損害額や航路整備費用と同様に、混雑に伴う遅延によりもたらされる損失（混雑費用）を同一の尺度、すなわち貨幣尺度で表しておくことが必要とされる。そこで、本節では、船舶が遅延することにより新たに発生する費用に関する検討を行う。

混雑費用を算定するためには、まず混雑費用を構成すると考えられる費目を抽出しなければならない。混雑費用の構成費目は、何度も述べたように、本来不要であったにもかかわらず船舶が遅延したことによって新たに必要となるものである。これは、

- ① より長い時間の航行を余儀なくされることによって船舶自体が被る運航経費

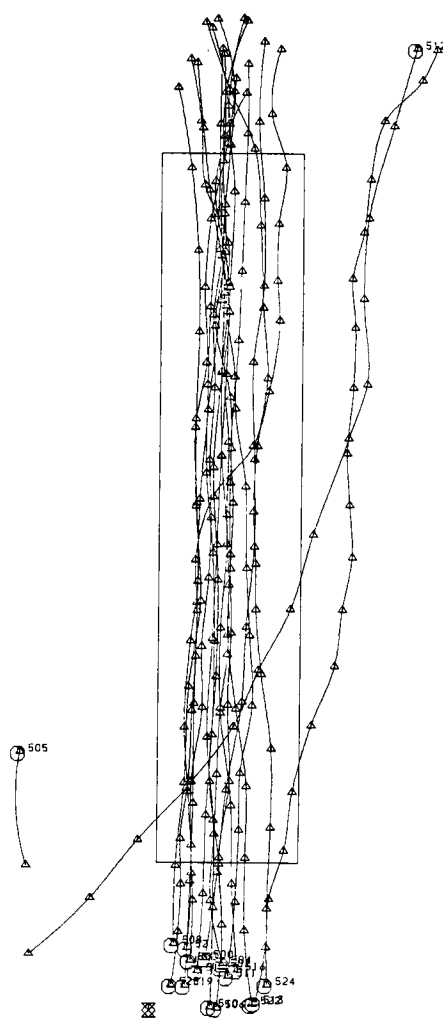


図8-3 実航跡の一例

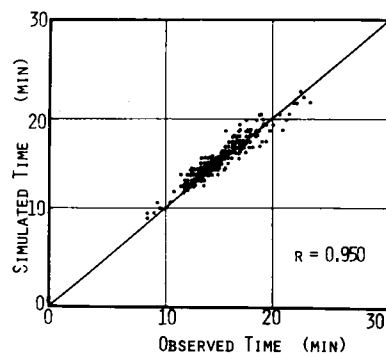


図8-4 航行時間の推定値と観測値との対応

- ② 船舶の到着が遅れることにより港内における諸作業に予定外の作業が生じ、これのために余分に必要となる費用
- ③ 貨物の受渡しが遅れることによって発生する費用

表 8-1 遅延により増加する可能性のある費用項目

①船費・運航経費	②港内作業経費	③貨物の延着に伴う経費
(1) 船舶償却費	(6) 水先料	(10) 貨物金利
(2) 船員費	(7) 曳船料	
(3) 保険料	(8) 綱取放料	
(4) 一般管理費	(9) 貨物料	
(5) 燃料費		

に大別される。このうち、遅延に伴う運航スケジュールの変更がもたらす営業上の損失や陸上輸送における不効率の発生といった波及的な損失は極めて特殊な状況（例えば、入港船舶が港湾前面に位置する航路を日没直前に航行している場合など）の下でしか生ぜず、その算定も多くの前提条件を要するためここでは検討対象からはずすこととして、①～③をさらに細かく分類したものが表 8-1 である。ところで、航行シミュレーション・モデルで試算した遅延時間は、5 km のモデル航路の場合、数分から十数分程度である。このことを念頭において表 8-1 を見直してみると、混雑費用の費用項目として検討すべきものは、(1)～(5)および(10)と考えられる。(1)～(4)を以下では一括して船費と呼ぶことにするが、これは船舶を保有しかつ運航可能な状態にしておくために必要な経費であり、航海時間の延長はこのような経費の浪費を意味する。(5)の燃料費は航海時間の延長分に対して余分の燃料を浪費するためであり、また、(10)の貨物金利は付加価値が急変しないかぎり積載されている貨物が延着することにより金利損失を生じるためである。以下では、上記 3 費目に関する遅延 1 時間あたりの費用を算定する。

#### (1) 船 費

下條<sup>18)</sup>は、海運中核 6 社の財務諸表より、1 ヶ月の積荷重量トン (DWT) 当たり船費を約 1200 円(昭和 52 年の値)と算定している。船舶の積荷重量トン数は総トン数の約 50 % 増しと見てよいことを考慮すると、船型  $k$  の船舶の  $t_d$  時間当たり船費  $C_S(k, t_d)$  は、総トン数を  $GT_k$  として、次のようになる。

$$C_S(k, t_d) = 1200 \times 1.5 \times GT_k \times \frac{t_d}{30 \times 24}$$

$$= 2.5 t_d \quad \dots\dots\dots (8.7)$$

#### (2) 燃料費

船舶の燃料消費量と総トン数の間には一定の関係が見られる。日本船舶明細書に記載された 1000 総トン以上の一般貨物船について、総トン数  $GT_k$  と 1 日当たり燃料消費量  $F_k$  (トン/日) の関係は、次の回帰式で与えられている。<sup>16)</sup>ここに、 $\rho$  は相関係数である。

$$F_k = 43.0 - 36.6 \exp(-8.7 \times 10^{-5} GT_k)$$

$$\rho = 0.971 \quad \dots\dots\dots (8.8)$$

ただし、一般に船型が同じであっても航海速力によって燃料消費量は異なるため、上の回帰にあたっては、船型が 1000 ～ 5000 GT の場合は航海速力が 10 ～ 14 ノットの船、5000 GT 以上の場合は 14 ～ 16 ノットの船の資料を用いた。これにより、燃料のトン当り価格を  $a_F$  とし、混雑によって生じる航海時間の増分を  $t_d$  時間とすると、船型  $k$  の船の燃料費増分  $C_F(k, t_d)$  は次式で与えられる。

$$C_F(k, t_d) = a_F \frac{t_d}{24} F_k \quad \dots\dots\dots (8.9)$$

### (3) 貨物金利

航路を航行する各船舶が積載する貨物の金利損失額は貨物の年利率  $i$  と総価額から計算される。すなわち、単位重量当りの貨物価額を  $a_C$ 、積載率を  $\lambda$  とし、前述の積載重量トン数と総トン数との関係を用いると、船型  $k$  の船舶に関する積載貨物の  $t_d$  時間当り金利損失額  $C_I(k, t_d)$  は、

$$C_I(k, t_d) = a_C i \lambda 1.5 GT_k \frac{t_d}{365 \times 24} \quad \dots\dots\dots (8.10)$$

として求められる。ここに、積載率  $\lambda$  は船舶の積載重量トン数に対する積載貨物重量の比を意味する。

以上より、結局、船型  $k$  の船舶が混雑により  $t_d$  時間遅延する場合の損失額  $C_T(k, t_d)$  は、

$$C_T(k, t_d) = C_F(k, t_d) + C_S(k, t_d) + C_I(k, t_d) \quad \dots\dots\dots (8.11)$$

として計算される。

表 8 - 2 船型別混雑費用

表 8 - 2 は各船型ランクごとの船舶に対し遅延 1 分あたりの混雑費用を計算したものである。ここに (8.7) ～ (8.11) 式のパラメータの値として表 8 - 3

費目 船型ランク	(1) 燃料費	(2) 船 費	(3) 貨物金利	(1)～(3)の合計
～ 20	367. 5	0. 7	0. 4	368. 5
20 ～ 100	378. 3	3. 1	1. 7	383. 2
100 ～ 500	436. 0	16. 5	9. 1	461. 6
500 ～ 3000	701. 8	84. 9	47. 2	833. 8
3000 ～	1579. 7	516. 2	286. 6	2382. 5

(GT) (単位は 1 隻 1 分当たり 円)

に示すものを用いた。 $a_F$ 、 $a_C$  については神戸港港湾統計 (昭和 57 年) に基づいて算出されたもの<sup>16)</sup>である。

表 8 - 3 用いたパラメータの値

$a_F$	82, 000 (yen/ton)
$a_C$	160, 000 (yen/ton)
$\lambda$	0. 5 (1/year)
$i$	0. 1 (1/year)

## 8 - 5 結 語

航路整備は、航行安全性の向上のみならず迅速性・経済性の向上といったさまざまな効果をもたらす。これらの諸効果は、本研究で提案する航路計画方法論の中で、期待費用の低減に伴って生ずる便益として取り扱われる。混雑

費用の低減による便益は、事故損失の低減によるものとともに航路整備がもたらす便益の大きな部分を占めているため、本章では混雑費用の算定方法に関する検討を行った。検討内容は、混雑による遅延時間を推算するためのモデルの開発と、単位遅延時間当りの混雑費用の算定の2つに分けて進められた。以下にその概要を示す。

- (1) 船舶の航行挙動を記述する既往のシミュレーション・モデルを概観し、今回開発したシミュレーション・モデルが有すべき機能に関する指針を得た。
- (2) 航路整備ならびに航行規制による遅延時間の低減効果を簡便に推定しうよう、航路特性と交通特性を容易に考慮しうるマイクロ・シミュレーション・モデルを作成した。航行実態観測データおよびこれと同一条件下で実行したシミュレーション結果から得た航路通過に要する航行時間を比較したところ、ほぼ良好な現象再現性が見られた。
- (3) 遅延に伴い生ずる混雑費用を構成する費用項目を抽出し、それぞれの算定方法を示した。
- (4) 港湾統計等から費用算定に用いるパラメータの標準的な値を求め、船型ランクごとの単位時間当たり混雑費用を計算したところ、100～500 GT の船舶で約460円/分、500～3000 GT の船舶で約830円/分という値を得た。

以上の結果を用いることにより、航路整備による混雑緩和効果を貨幣タームで測定することが可能となった。次章の数値計算例では、混雑費用の低減によりもたらされる便益が事故損失の低減により生ずる便益にほぼ匹敵する大きさであることが示される。

## 参考文献

- 1) 黒田・喜多・河野：避航領域に着目した海上交通容量の一試算，第38回 土木学会年次学術講演会講演概要集，第4部，pp.141～142，1983
- 2) Y. Nagao, K. Kuroda, H. Kita and K. Inoue : Safety Improvement Planning of Narrow Waterway, Proc. of the 26th Int. Nav. Cong., PIANC, Brussels, 1985
- 3) 長尾・黒田・喜多：リスク・便益分析に基づく水路改良計画に関する方法論的研究，土木学会論文報告集，（投稿中）
- 4) 山田一成・田中健一：船舶交通流におけるシミュレーション結果の評価とその推定について，日本航海学会論文集，No.48, pp.135～138, 1972
- 5) 喜多秀行・長尾義三：待ち行列理論を用いた交通解析とその応用に関する基礎的研究，第33回 土木学会年次学術講演会講演概要集，第4部，pp.113～114, 1978
- 6) 木俣昇・石崎肇士：シミュレーションによる航路計画の研究，土木学会論文報告集，No.194, pp.



113 ~ 126, 1971

- 7) 奥山育英：ネットワーク・シミュレーション，航海，No. 80, pp.20 ~ 27, 1984
- 8) 杉崎昭生ほか：航路設計のための海上交通容量—I，日本航海学会論文集，No. 50, pp.39 ~ 45, 1973
- 9) 山田一成・田中健一：船舶交通流制御シミュレーションについて，日本航海学会論文集，No. 54, pp.55 ~ 59, 1976
- 10) 海上保安大学校海上交通工学研究会：来島海峡海上交通シミュレーション解析報告書，1982
- 11) 京都大学起終点施設学研究室：ふ頭標準能力調査報告書，p.115 1968
- 12) J. Weille and A. Ray : The Optimum Port Capacity, J. of Transp. Eoc. and Policy, Vol. 8, No. 3, pp.244 ~ 259, 1974
- 13) N. Noritake and S. Kimura : Optimum Number and Capacity of Seaport Berths, J. of Waterway, port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 109, No. 3, pp.323 ~ 339, 1983
- 14) B. N. Metaxas : The Economics of Tramp Shipping, pp.119 ~ 153, Athlone Press, 1971
- 15) 織田政夫：海運経済論，成山堂，pp.269 ~ 289, 1977
- 16) 長尾・黒田・井上：台風時における船舶避泊経費について，日本航海学会論文集，No. 70, pp. 187 ~ 197, 1984
- 17) 運輸省第二港湾建設局・日本海難防止協会：東京湾船舶航行実態調査報告書，1976      ならびに  
運輸省港湾技術研究所設計基準部システム研究室調べ
- 18) 下條哲司：船型の船価・運送原価・収益への効果，海事産業研究所報，No. 165, pp.5 ~ 20, 1980

## 第9章 航路計画の検討手順と簡単な例題\*

### 9-1 概 説

幅狭水域における船舶の衝突事故は、航路利用者のみならず多方面にわたり甚大な損害をもたらす。それ故、航路における航行安全性はできる限り高いものであることが望ましい。また、迅速性や快適性などの向上も輸送効率の改善等の見地から強く望まれている。しかし、航路の整備には費用を要し、無限の投資が可能なのわけではない。そこで、両者のバランスが最も適切となるような整備水準を探索することが実際の問題となってくる。さらに、上述の航路の諸機能間の達成度のバランスにも意を払うことが要請される。

さて、第5章で、リスク・アセスメントの考え方に基づく航路計画の基本的な枠組みを示し、以降の章でこれを構成する個々の部分システムに関する、より詳細な検討を行った。ここでは、これらの章で検討した結果をもとに、先に示した基本的枠組みの内容をさらに具体的に記すことによって、航路計画の手順としてとりまとめる。また、モデル航路を想定してケース・スタディーを行うことにより、数値的な検討を加える。

### 9-2 航路計画の検討手順

図9-1は本研究で提案する航路計画の検討手順を示したものである。図中に破線で示された区分のうち、(I)は新たに航路計画を策定する必要があるか否かを事前に検討する手順を示し、(II)は(I)における検討の結果、新たな航路計画を策定する必要が生じた場合に望ましい計画代替案を選定する手続きを示す。

まず、計画期間  $t = 1 \sim T$  に至るまでの各年次における計画対象交通流  $F_t$  を設定する。計画対象交通流は先決的に与える場合もあるが、多くは関連諸港湾の将来貨物量の推計値や船型の変化の傾向などから推定することとなる。ただし、この部分については研究の蓄積も少なく今後の進展に待つ部分も多いため、本研究では研究の対象外とし、別途与えられるものとする。

次いで、計画の対象となる航路の物理的形状と航行規制に関する現在の状態を調査する。ここでは物理的形状を  $S_P$ 、航行規制を  $S_R$  と表わすこととし、それぞれの現在 ( $t=0$ ) の状態を、 $S_{P0}$ 、 $S_{R0}$  と記す。

この3要素 ( $S_{P0}$ 、 $S_{R0}$ 、 $F_t$ ) を知ることによって、航路諸元に関する物理的な最低許容基準（最小航路幅など）が満足されるか否かが判断される。ここでの判断基準には、5-3-2で概観した従来の検討方法により得られた数値が用いられる。この結果、もし現行の航路諸元のうちいずれかが最低許容基準を

---

\* 本章の一部は文献1)として発表している。

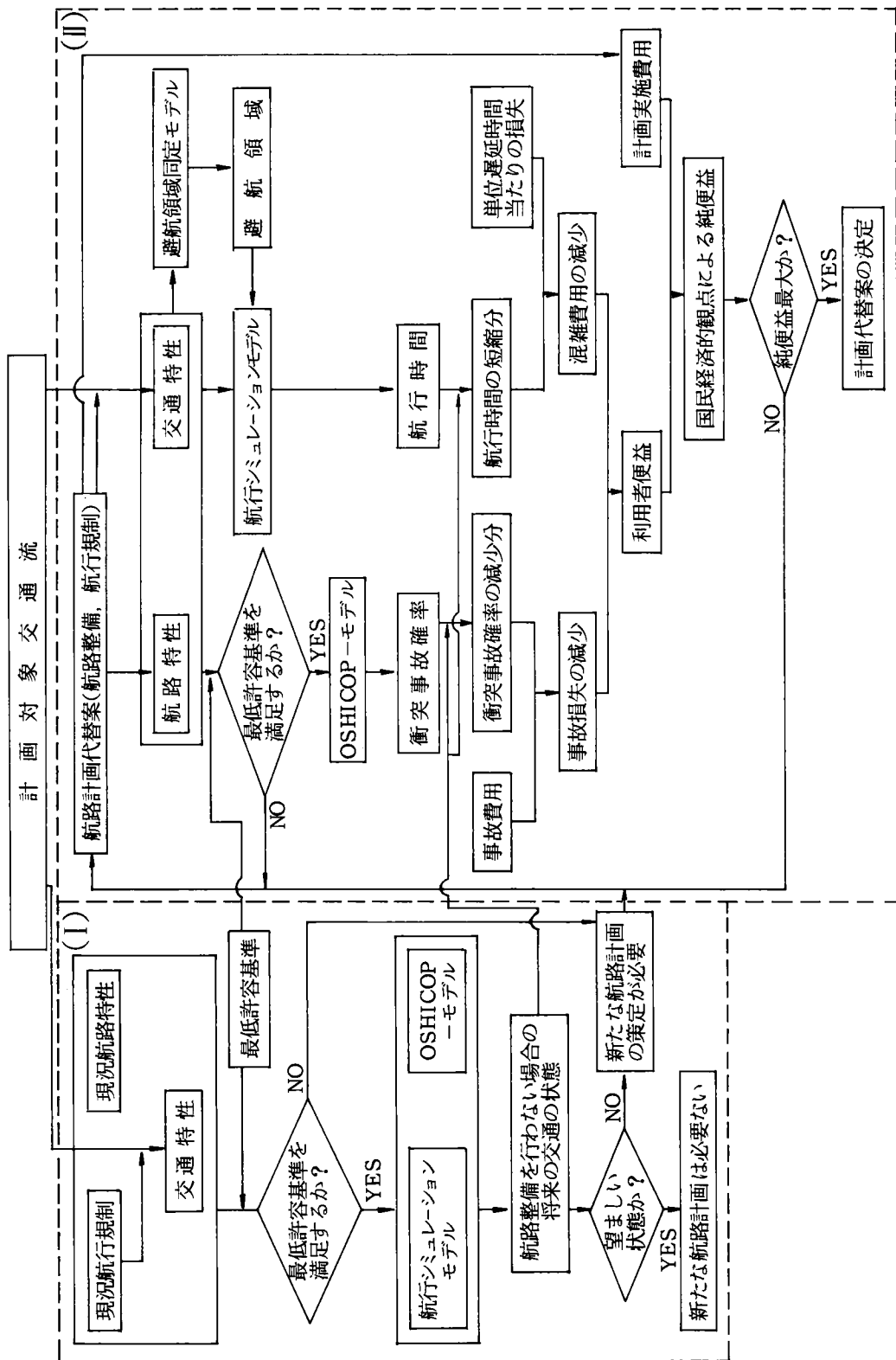


図9-1 航路計画の検討手順

満足しないならば、これを満たすため、新たに航路計画を立てなければならない。基準を満足する場合は、航行シミュレーション・モデルならびにOSHICOP-モデルを用いて、現況に何ら手を加えないままの航路へ計画対象交通流を流した場合の交通流の状態、すなわち、ここでは航行時間、 $T_{st}$ 、と衝突事故確率、 $P_{ct}$ 、

$$\left. \begin{aligned} T_{st} &= T_{st}(F_t | S_{p0}, S_{R0}) \\ P_{ct} &= P_{ct}(F_t | S_{p0}, S_{R0}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9.1)$$

を推定する。

もし、予測された将来の交通状態が望ましいものであるならば、それはそれでよく、改めて航路計画を立てる必要はない。5-2で引用した佐佐木<sup>2)</sup>が指摘しているのはこのことである。しかし、一般には、何も手を加えることなく迎える将来の姿は望ましいものではないことが多いため、よりよい姿へと導くためにはどの計画代替案を選択し、実施することが良いかを(Ⅱ)の手順に従って検討することとなる。

さて、上述の結果として得られる将来の望ましからざる交通の姿を知ることができたなら、これを改善するためのいくつかの対応策が策定される。これらの対応策の組み合わせ( $S_{pi}$ ,  $S_{Ri}$ )が計画代替案にはかならない。第6章で得られた計画諸変数と衝突事故確率との間の関連や第8章で示したシミュレーション・モデルによる種々の検討結果を念頭において置くことは、計画代替案群を作成する際に役立つ。作成されたいくつかの代替案の1つ、( $S_{pi}$ ,  $S_{Ri}$ )に対して、(Ⅰ)と同様に $S_{pi}$ が最低許容基準を満足するか否かをまず判定する。満足しないならば別の代替案を検討し、満足するようであれば OSHICOP-モデルを用いて航行安全性に関する検討を加える。この作業では、計画代替案により規定される航路特性と交通特性をモデルに入力することにより、当該計画代替案の下で計画対象交通流を流した場合の船型対別の年間期待衝突件数 $N_{kk'i}$ 、

$$N_{kk'i} = N_{kk'i}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) \dots\dots\dots (9.2)$$

が求められる。計画代替案( $S_{pi}$ ,  $S_{Ri} | F_t$ )を実施することによってもたらされる船型対別年間期待衝突件数の減少分、 $\Delta N_{kk'i}$ は、(9.2)式に示す現況の航路における船型対別年間期待衝突件数 $N_{kk'0}$ との差

$$\Delta N_{kk'i}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) = N_{kk'0}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) - N_{kk'i}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) \dots\dots\dots (9.3)$$

として与えられる。

一方、第7章に示した方法で、船型 $k$ と $k'$ の船舶が衝突する場合の事故1件当りの平均損害額、 $l_{c_{kk'}}$ を知ることができる。したがって、衝突事故に起因する年間総期待損失額の減少分、 $\Delta L_c(S_{pi}, S_{Ri} | F_t)$ は、船型 $k$ と $k'$ に関する両者の積の総和、

$$\Delta L_c(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) = \sum_k \sum_{k'} (l_{c k k'} + l_{c k' k}) \cdot \Delta N_{k k' i}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) \quad \dots\dots\dots (9.4)$$

をとることによって求められる。上述の如き、計画の実施に伴う航行安全性向上の貨幣タムによる測定と並行して実施する迅速性の向上に関する検討は、次のような手順による。

まず、航路特性と交通特性を第4章で開発した避航領域同定モデルに入力し、種々の船型の船舶ごとに避航領域の大きさの分布を求める。次いで、得られた分布を、第8章で構築した航行シミュレーション・モデルにおける航行状態の決定を行う2つの副プログラム、ENTERとSEARCHに組み込む。しかる後、計画代替案*i*に対応する航路特性、交通特性の下でシミュレーションを実施し、船型別の遅延時間 $T_{ki}$ 、

$$T_{ki} = T_{ki}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) \quad \dots\dots\dots (9.5)$$

を出力として得る。そして、遅延時間の短縮分、 $\Delta T_{ki}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t)$ を、現行の航路における船型別の遅延時間 $T_{k0}$ との差、

$$\Delta T_{ki}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) = T_{k0}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) - T_{ki}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) \quad \dots\dots\dots (9.6)$$

をとることにより求める。

一方、8-4に示した方法により、船型*k*の船舶が被る単位時間当りの遅延損失 $l_{dk}$ を知ることができる。当該航路における年間期待総遅延損失の減少分、 $\Delta L_{dk i}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t)$ 、は当該航路の船型別年間交通量を $Q_k$ として、次式により与えられる。

$$\Delta L_{dk i}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) = \sum l_{dk} \cdot \Delta T_{ki}(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) \cdot Q_k \quad \dots\dots\dots (9.7)$$

これより、現在の航路( $S_{p0}, S_{R0}$ )を計画代替案( $S_{pi}, S_{Ri}$ )へと改善することによって、航路利用者が新たに享受する便益 $B_t(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0}, F_t)$ が、次式の定義に基づき算定される。

$$B_t(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0}, F_t) = L_c(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) + \Delta L_d(S_{pi}, S_{Ri} | F_t) \quad \dots\dots\dots (9.8)$$

他方、航路計画を実施に移すためには計画実施費用、 $C_c(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0})$ 、が必要となる。したがって、望ましい航路計画とは、少ない計画実施費用で大きな利用者便益を上げられるものということになる。公共事業としての航路整備は多くの場合国民経済的観点に立って行なわれ、この場合、計画の評価基準として各種のものが用いられている。評価基準の選択に関してはさまざまな議論があるが、ここでは効率性基準の1つである純便益最大化基準を用いることとする。

ところで、交通施設は一般に長期間にわたって供用されるものであり、航路計画とて例外ではない。

そのため、この間に発生し続ける便益と計画期間当初に投入される計画実施費用とを比較することは、異時点における価値評価となるため、何らかの方法で価値評価の時点を揃えておかなければならない。その1つが、全ての価値を現在価値に引き戻して相互に比較する方法である。そこで、 $T$ 年間にわたる利用者便益の総和をその現在価値、 $B_U(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0}, F_t)$ 、に換算しておく必要がある。

$$B_U(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0}, F_t) = \sum_{t=1}^T \frac{B_t(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0}, F_t)}{(1+r_s)^t} \quad \dots\dots\dots (9.9)$$

ここに、 $r_s$ は社会的割引率を示す。

したがって、設定した代替案群のうち次式で表わされる国民経済的に見た純便益 $NB_i$ を最大にするもの、すなわち、

$$\max_i NB_i = \max_i \{ B_U(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0}, F_t) - C_c(S_{pi}, S_{Ri} | S_{p0}, S_{R0}) \} \quad \dots\dots\dots (9.10)$$

が最も望ましい航路計画代替案として選ばれる。

### 9-3 簡単な例題

前節で示した検討手順を簡単な例題に用いてみよう。

計画の対象となるモデル航路は延長10 km、

幅員500m、水深20mの様な形状をした一方  
向航路である。航路延長の約40%の長さの区間  
は周辺部分まで十分な水深を持つ水域が広がっ  
ているが、残りの60%の区間は水深が10mしか  
なく、図9-2に示す断面に掘削されている。

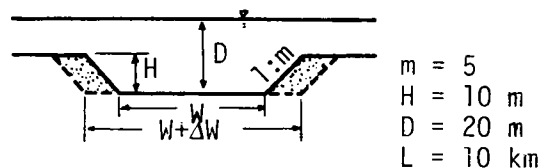


図9-2 モデル航路の断面図

この上を交通量40隻/時、パラメータ $\mu_w = 1.6$ 、 $\sigma_w = 0.25$ で規定される船型構成（これは、ほぼ現在の浦賀水道航路におけるものに相当する）の計画対象交通流が航行する場合を想定する。ただし、簡単のため、ここで操作する計画変数は航路幅員のみとし、他の計画変数は一定としておくものとする。したがって、ここでは種々の航路幅員を設定することが計画代替案を作成することに相当する。また、航路諸元に関する最低許容基準は、本研究の主たる興味の対象ではないため、全て満足されているものとする。計画期間（計画実施後の供用期間）は航路の一般的な耐用年数を参考に、ここでは50年<sup>3)</sup>とし、その間計画対象交通流は変化しないと仮定する。

航路と交通流に関する上記の条件の下で、OSHCOP-モデルを用いて船型別年間期待衝突件数を計算することができる。図9-3にその1例として航路幅が1000mの場合の結果を示す。以下では、説明の便宜上、船型を5つのランク（ $k = 1, \dots, 5$ ）に分けることとし、図にはこの船型ランクの組み合わせ

せごとに年間の期待衝突件数の計算結果を表示している。船型ランクとそこに属する船舶の総トン数の関係は表9-1のとおりである。本図より、航路上における船型対別の期待衝突件数が概ね0.1回から数回程度であることが理解される。船型別では $k=3$ ないし $k=4$ 、すなわち100GTから3000GTまでの船舶の衝突危険度が高いように見えるが、これは、この船型ランクに属する船舶の全交通量に占める構成比率の高さが反映されているためである。

既に述べたように、衝突事故確率と航路幅員とは密接な関係がある。そこで、個々の計画代替案、すなわち種々の航路幅員と年間期待衝突件数との対応関係を調べたものが図9-4である。この結果は、当然のことながら、より広い航路幅を有する航路が望ましいことを示している。

このようにして得られた航路幅と船型対別年間期待衝突件数の関係は、第7章で調査した船型対別衝突事故直接損失額(図7-2)を導入することによって船型対別年間期待事故損失に変換される。図9-5の破線は、これらの総和をとることにより計算される全船型に対する年間期待事故損失と航路幅と

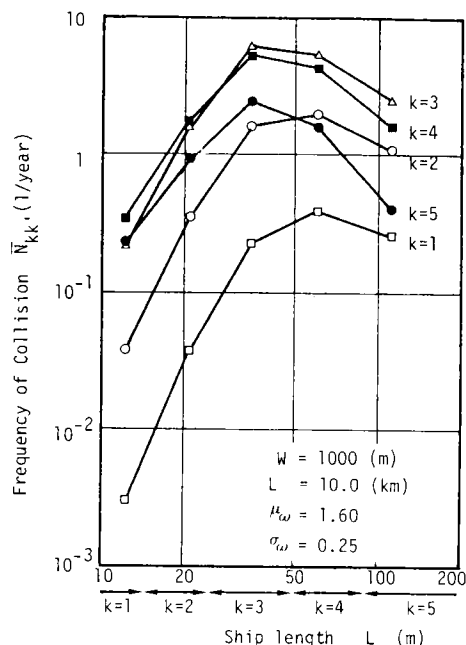


図9-3 船型対別年間期待衝突件数

表9-1 船型ランクと総トン数の対応

船型ランク	総トン数 (GT)
$k=1$	5 ~ 20
$k=2$	20 ~ 100
$k=3$	100 ~ 500
$k=4$	500 ~ 3000
$k=5$	3000 ~

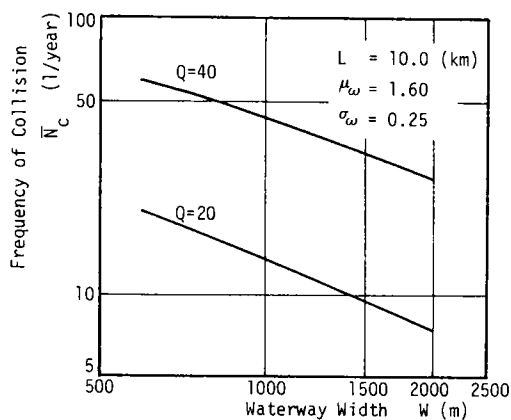


図9-4 航路幅と年間期待衝突件数の関係

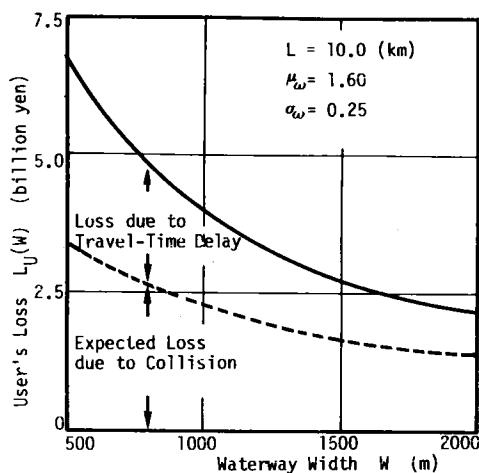


図9-5 利用者の期待費用

の関係を描いたものである。現行の航路幅である  $W_0 = 500\text{m}$  に対応する損失額と各航路幅の下での損失額との差が航行安全性の向上による便益という形で利用者にもたらされる。

次に、迅速性の向上として利用者にもたらされる便益を算定しよう。図9-6は上述の条件を航行シミュレーション・モデルに入力し、種々の航路幅の下での船舶の平均航行時間を求めたものである。一般に船舶の航行速

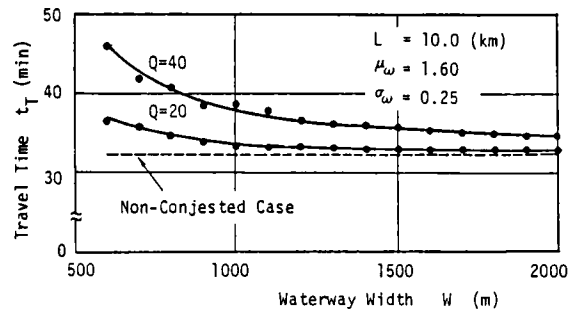


図9-6 航路幅と航行時間の関係

度は船型が大きくなるにつれて速くなるため、航路上での混雑が甚だしくなるにつれて、大型船が自由速度に近い速度で航行する小型船に追従する傾向が現れてくる。そのため、全船舶が同程度の速度で航行しているような場合は、船型が大きな船舶ほど遅延時間も長くなることに注意を払っておく必要がある。

他方、船型ランクごとの単位遅延時間費用は表8-2のように計算される。この結果と船型別平均遅延時間、ならびに船型別年間交通量から船型別にみた年間の混雑費用が算定され、その総和をとることによって全船型に対する年間期待混雑費用が求められる。各航路幅に対する年間期待混雑費用は事故損失額と共に図9-5に示してあり、この両者から航路幅と利用者費用の関係が実線で示すように対応づけられる。

そして  $T$  年間における両者の和を (9.9) 式を用いて現在価値に換算すると、利用者総便益の現在価値  $B(W | W_0, T)$  が求まる。

一方、航路改良に要する費用は、図9-2に示すように、航路周辺水域の平均水深から航路底面までの掘削深さが  $H$ 、航路側端の勾配が 1:5 である台形断面を有する航路を想定し、単位土量あたり掘削費用を  $C_e$  として算定する。ただし、航路幅は一般に当該水路の最狭隘部の幅員によって規定されていることが多く、航路の一部区間を掘削するだけで全体としての拡幅が可能となる場合がある。そこで、これを航路全長に対する要改良区間長の比、 $r_L$ 、として表わすこととし、

$$C_c(\Delta W | W_0) = C_e(W - W_0) H L r_L \quad \dots\dots\dots (9.11)$$

により与えられるものとした。この時、 $T$  年間に発生する純便益  $NB$  は、

$$NB(W | W_0, T) = B(W | W_0, T) - C_c(\Delta W | W_0) \quad \dots\dots\dots (9.12)$$

として表わされる。図9-7に、航路幅の変更に伴う改良費用と便益、および両者の差として与えられる



純便益の変化を示す。社会的割引率は年間6%, 掘削費用は1000円/m<sup>3</sup>の場合を考えている。また, 前述の要改良区間長の比は0.6とする。本図より, 設定条件の下では航路幅を900mとすることが最も望ましい代替案であることがわかる。ただし, 今回は考慮に入らなかったが, 事故による間接費用も相当大きな額となるものと推測されるため, 實際上, 望ましい航路幅はさらに広がるものと考えられる。なお, 図9-8に改良代替案の選定に及ぼす社会的割引率の影響を, 図9-9に同じく要改良区間長の航路全長に対する比率の影響を示しておく。

#### 9-4 結 語

本章では, 航路計画における適切な代替案選択の手順を整理し, 簡単化された計画事例を想定してケース・スタディーを行った。ここで述べた考え方の最も大きな特徴は, これまで「安全は何ものにも代えがたい」として, ともしれば無制限に追求されようとしてきた航行安全性を, 限度はあるにせよ定量化し, 迅速性を主たる内容とする他の航路機能や計画の実施費用とのバランスをも考慮することによって適切な水準が見出せるはずで

あるとするとともに, 航路計画の計画変数と航路機能の発揮されている程度を示す指標との関連を明らかにしておきさえすれば当該水準を実現するために実施すべき航路計画代替案を容易に探索できると主張している点にある。また, これまで単なる事項の関連図でしかなかったいわゆる“計画のフロー”を, 各ステップで必要とされる情報と作製される情報を明示的に示すことによって, 検討の過程で行うべき

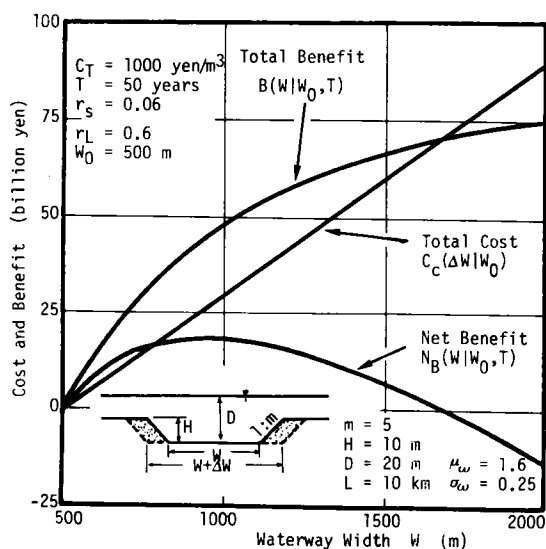


図9-7 航路拡幅に伴う純便益の変化

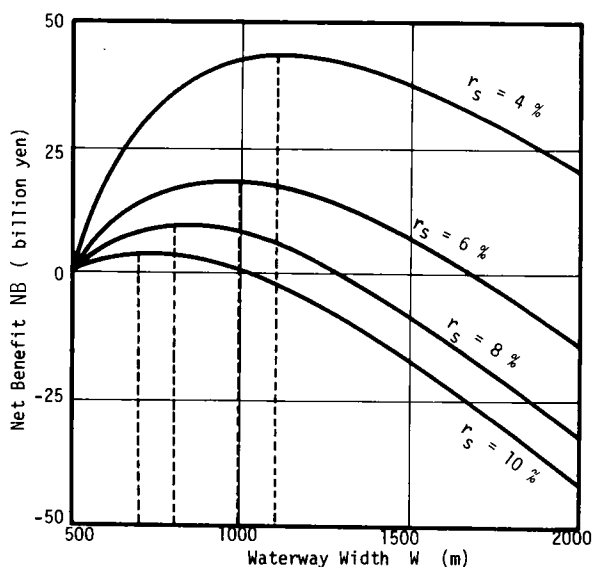


図9-8 社会的割引率が代替案選定に及ぼす影響

諸作業の関連が示されている本来の意味での“計画のフロー”とした点も特徴の1つである。

ケース・スタディーでは、この手順の有効性を簡明に示すために、航路幅のみを操作可能な計画変数とする極めてシンプルな事例を想定し、数値的な検討を行った。この検討を通じて、以下の諸点が明らかになった。

- (1) 想定した条件の下では、航路上で船舶相互の衝突によりもたらされる期待損害額は年間数十億円にも上り、実際には、これに加えて人命の損失や海洋汚染などに伴う費用が発生するため、航路における事故損失は予想以上に大きなものがある。
- (2) しかしながら、同時に、この損失は航路の拡幅によってかなりの程度低減可能となる。
- (3) 同じ条件の下で、混雑による損失は衝突による損失とはほぼ同程度にも上り、航路拡幅がもたらす混雑解消効果も無視できない。
- (4) 航路の拡幅がもたらす航行安全性の向上に伴う期待損失の低下と混雑費用の低下を航路の拡幅に要する費用と比較し、純便益を計算したところ、想定条件の下では純便益が極大となる航路幅が見出された。これをもって本研究で取り扱った範囲における最も望ましい計画代替案と見なすことができると同時に、一連の検討を通じて、本研究で提唱した方法論と開発したモデルの有効性がある程度まで示された。

なお、本ケース・スタディーでは計画変数を航路幅のみとしたが種々の航行規制の実施や航路横断橋の開口幅決定などに対しても、同様の手順で検討を進めることができる。また、ここでは交通流の状態を表わす指標として衝突事故確率と遅延時間のみに着目したが、これら以外にももちろん適切な指標がある。しかし、その場合でも、新たな指標に関する一連の手続きを、検討手順の中の両者の手続きと並列する位置に組み入れることによって考慮することが可能である。

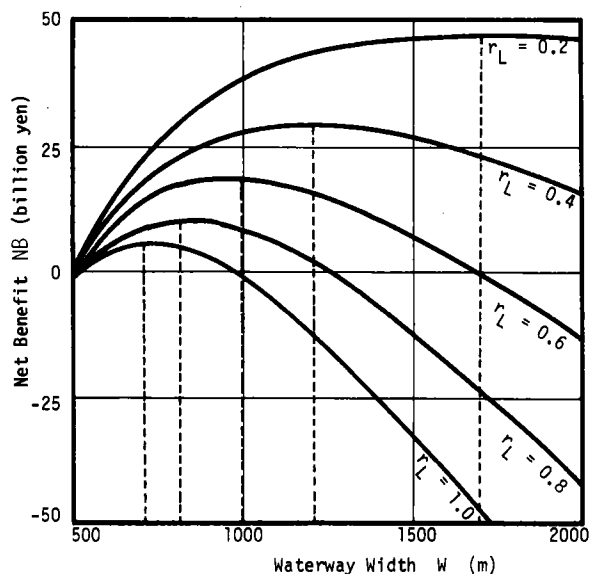


図9-9 要改良区間長の比率が代替案選定に及ぼす影響

## 参考文献

- 1) 長尾・黒田・喜多：リスク・便益分析に基づく水路改良計画に関する方法論的研究，土木学会論文報告集（投稿中）
- 2) 佐佐木綱：計画基礎数理，第1回土木計画学シンポジウム，pp.29～30，1967
- 3) 長尾義三：土木計画序論，共立出版，pp.110～112，1972

## 第10章 結 論

一般に、システムが整備され効率化される程それに対する利用も高度化し、システムへの依存度も高まる。このような状況が進展すればするほど、何らかの原因でその機能が停止した場合のダメージは大きくなる。したがって、利用が高度化し集積が進むにつれて、その機能が常に発揮され機能停止による損失を被ることのないよう、本来の機能面における効率性のみでなくシステムの信頼性をも高めておくことが要請される。すなわち、本来の機能に加えて信頼性をも併せ持ったシステムを具現化するために、両者をいかにバランスよく高めるか、がシステムを計画するにあたっての主眼となる。

この意味で、航路計画はその典型であり、貨物や旅客を大量かつ迅速に輸送するという機能と、航路上での事故に代表される機能停止の発生を防止するための信頼性の双方を効率よく高める方策を探りあてることがその内容となる。本研究は、このような観点に立って航路計画の方法論について考察を加え、その基礎となる海上交通流の挙動を解析した。

研究は2編に分けて進められ、第Ⅰ編では海上交通流の解析を、第Ⅱ編では航路計画の方法論に関する議論を行った。ここで得られた主要な成果は以下のとおりである。

第Ⅰ編では、冒頭で、交通流を解析する際には結果の利用法を常に念頭に置いておくべきであり、目的に応じた解析の視点とその方法が存在することを強調した。しかる後、第2章で、まず海上交通流が、道路交通流と対比して、①運動の二次元性、②操縦性の低さ、③操船に際しての不確実性の大きさ、の3点で特徴的であることを述べた。また、操船挙動に占める操船者の意思決定行動の割合が極めて大きいため、交通流を解析するに当たってこの事実には十分考慮を払っておくことの重要さと、確率論的な挙動記述の必要性を指摘した。そして、第3節以降では、海上交通流の基本的な特性のうち、以下の検討が必要となるにもかかわらずこれまで明らかにされていなかった、航路上を航行する船舶の方位角分布、避航開始距離分布、避航船舶の航過距離分布の3つを観測データを整理することにより定式化した。

第3章は、航路計画において先に述べたシステム信頼性に相当する航路上での船舶衝突事故危険度について検討したものである。ここでは、海上交通流の全体的挙動の変化が主として安全性の面に反映されることを指摘し、第2章で明らかにした交通流の基本的特性を用いて、一様な航路と横断交通のある航路、および航路横断橋が存在する航路における船舶衝突事故確率を推定する理論モデル（OSHICOPモデル）を構築した。このモデルには、中央分離表示の有無や横断橋橋脚までの緩衝帯幅といった、衝突事故確率に大きく影響するにもかかわらず従来のモデルでは考慮されなかった航路計画の際の計画変数が操作変数として豊富に組み込まれているだけでなく、航行船舶の船型構成や速度のばらつき、方向別の交通量などの変化による影響を、分布形を規定するパラメータを変更するのみで極めて簡便に知

ることが可能なため、計画代替案ごとの衝突危険度を詳細に検討できるという利点を有している。モデルは良好な現象説明力を有することが検証されており、これで航路計画の実施に伴う衝突事故確率の変化を予測することが実用上十分な精度で可能となった。この種の既往のモデルと比較して、本モデルが航路の安全性向上方策の探索と代替案評価を行うための道具として、操作性と現象説明力の点でより適切であることが示された。また、この種のモデルを作成、検証する過程に存在する問題点についても議論を加えた。

第4章では、船舶の避航領域に関する解析を行った。ここでは、避航領域の概念について再考し、これを記述するための記述形式が有すべき要件を提示した。これによって、従来より繰り返行なわれてきた議論が、概念そのものの定義を論じようとするものではなく、単にその境界をどこに設定するかが主たる論点であったことを指摘し、避航領域の境界は、これまではそうではなかったのだが、交通流の全体的挙動の把握やサービス・レベルに応じた実用交通容量の算定といった解析と利用の目的に応じて設定せらるべきことを強調した。しかる後、「避航領域は操船者の意思決定の結果として生成されるものである」との著者の考え方を述べ、この考え方に沿って非集計的な避航領域のモデル化を行った。避航領域の解析は、これまでわずかの例を除いて観測データを統計的に整理したものであり、ここに示したようなモデル化は現在のところ他に類を見ないものである。出力の面からこのモデルを見ると、避航領域を分布として取り扱い、その形状が航行環境と船舶特性によって規定される点が本モデルの特徴と言える。一定の条件下で試算した結果、従来の提唱値よりやや小さな平均値を有するほぼ正規分布に近い形状をした側方避航領域が得られている。これについて、著者は、従来の整理値が解析対象の中に非避航船を含んでいたため、これによる影響を分離しえなかったことがこのような結果に反映されたものと考えている。なお、モデル化に加えて、観測データを用いてモデルの妥当性を検証する方法をも開発した。

一方、第Ⅱ編では航路計画の考え方とその手順に関する検討を行った。第5章では、航路計画の基本要素を整理すると共に、既往の航路計画の方法論の問題点を指摘した。航路計画の目的のあいまいさ、航路機能の定量的把握の欠如、ならびに計画変数と航路機能の対応づけの欠如の3つがその主たるものであり、これが結果的に、航路計画に合理性の裏付けが十分でなかったこと、および、計画のフローが単なる要素間の関連図でしかなかったことをもたらした。これを受けて、

- ① 航路の機能が発揮されている度合を定量的に考慮した航路計画
- ② 航路の望ましさに対する総合的な評価
- ③ リスクが存在するシステムの分析と計画
- ④ 計画対象交通流の概念
- ⑤ 航行規制を考慮にいった航路計画

という5つの観点から、航路計画の方法論を論じ、リスク・アセスメントの考え方を参考に、航路計画の方法論に関する基本的枠組みを提示した。

第6章では、船舶衝突事故確率が航行安全性、ひいては混雑の程度を表わす1つのよい指標であることを述べ、これをもって航路整備と航行規制の評価を試みた。具体的な検討には第3章で構築したOSHICOPモデルを用い、航路整備と航行規制に関する種々の方策と衝突事故確率とを対応づけた。検討結果から、衝突確率が時間交通量および航路幅の冪乗にほぼ比例すること、方向別交通量比ならびに航路境界条件と衝突確率は極めて密接な関係にあること、などが明らかにされ、さらに、方向別交通量比が0.5に近い航路で航路中央分離表示を設置することの効果が大きいこと、一方向の交通量が卓越する場合には中央分離表示の変移が有効であること、10ノット以下の最高速度制限を設けることはかえって逆効果を招くこと、などの有用な知見が数多く得られた。また、最大船型の制限は、制限船型が分担する輸送量が他に転換するとした場合にのみ有効となり、交通機関分担の面からも検討を加える必要があることなどについても触れた。以上の解析を通じて、今後は航路整備や航行規制を単独で実施することにこだわることなく、これらを適切に組み合わせ、いかにして効果的なものとするかの選択が重要であることが理解された。

第7章では、前章の結果を他の評価項目と比較するため、貨幣換算を行なう方法を示した。安全を貨幣タームで測ることに抵抗を感じるという意向も見られるが、こと船舶の運航に関する限り、暗黙裏に安全性と経済性を比較していることがまず述べられ、事故危険度の尺度として適切である期待損害額を知るために、「事故1件当たりの期待直接損害額」を求めることが本章の目的であることが明らかにされた。そして、海難調査データに基づいて、衝突に起因する直接損害額を解析した結果、全ての船型についての平均的な額が約3900万円に上がることがわかった。

第8章では、航路のいまひとつの機能である迅速性に関する検討を行った。ここでは迅速性の指標として、航路を通過する際に混雑により被る遅延時間を採用した。そして、航路の特性とこの遅延時間との関係を知るために、第4章で開発した避航領域モデルに基づく航行シミュレーションモデルを作成した。実績値および同一条件下で求めた計算値とを比較し、航行時間に関してはよい現象再現能力を有していることが検証された。これより、使用の目的によっては簡単な構造のシミュレーションモデルであっても実用上十分であることが再認識された。本モデルが現象再現性に優れている事実は、第4章で開発した避航領域モデルの妥当性を裏付けるものである。また、シミュレーションモデルの妥当性についても言及し、使用の目的に応じて検証の方法や適合性をチェックする指標が異なることを述べた。

第9章は、第Ⅱ編における議論を総合する部分に当たる。ここでは、第5章で提示した航路計画の考え方にに関する基本的枠組みに、第6章～第8章で検討した結果を導入して「航路計画の検討手順」としてとりまとめると共に、簡単な例題を通じて検討を加え、その妥当性を示した。

以上の検討を通じて、海上交通流の解析と航路計画の方法論に関する著者の考え方を述べた。これにより、この分野におけるこれまでの研究に若干なりとも新たな視点を示しえたのではないかと考えているが、残された課題も少なくない。列挙すると、

- ① 交通流特性の解析に関しては、影響要因の数に比べて何といてもデータの量が少ない。したがって、これまで得られた成果の中には、ある程度特殊な状況下に限定されたものもある。これらを明らかにするため更に多くのデータの集積を図り、より普遍的な解析結果とする必要がある。
- ② 航路上における遅延時間の推定にはシミュレーションモデルを用いたが、理論面からの解析やモデル化をさらに進め、海上交通流あるいは二次元交通流を対象とする交通流理論の構築を図ることが望まれる。
- ③ 操船者の行動モデルに関しては効用関数の同定等さらに精緻化を図ることが期待される。
- ④ 航路計画の対象領域として、施設計画と管理・利用計画だけでなく計画の5要素で言うところの構成、即ち、構想から実施に至るプロセスをも取り込めるよう拡張して行く必要がある。

などであり、これらが本研究で成し得なかった課題あるいは本研究を進める過程で新たに明らかとなった今後の研究の方向である。

## 謝 辞

本論文の作成にあたっては、多くの方々から貴重なる御指導と御助言を賜った。

とりわけ、著者の研究生活の端緒を開き、自由な研究の機会を提供していただいたと共に、研究の遂行に際し終始御指導、御鞭撻を賜った京都大学工学部教授長尾義三先生に対して、まず深甚の謝意を表わしたい。

また、著者に海上交通の分野に関する研究の重要性を示唆され、研究のあらゆる面において適切な御指導と有益な御助言を数多くいただいた京都大学工学部助教授黒田勝彦先生に心から感謝の意を捧げたい。

研究を進めるにあたって、神戸商船大学助教授井上欣三先生からは、熱心な討議を通じて操船と海上交通実態観測調査の豊富な経験に裏付けられた重要な御指摘をいただいた。また、運輸省電子航法研究所所長藤井弥平氏、神戸商船大学教授原 潔先生、運輸省港湾技術研究所システム研究室室長奥山育英氏をはじめ多くの方々から有益な討議を賜った。さらに、データの解析や計算の面で、高橋浩二氏（現運輸省）、河野一郎氏（現佐藤工業）、藤井滋氏（現近畿日本鉄道）、小川秀史氏（現愛知県庁）、稲垣勝伸氏（現大阪府庁）のご協力をいただいた。併せて感謝を申し上げたい。

資料収集に関しては、運輸省港湾技術研究所設計基準部システム研究室の方々、ならびに、海上保安庁警備救難部航行安全課の各位の御好意をいただいた。ここに御礼を申し上げる。

最後に、著者の研究生活を支えていただいた、京都大学工学部交通土木工学教室起終点施設学研究室の諸兄のご好意がなければ本研究はありえなかった。記して感謝する次第である。



## 主 要 記 号 一 覧

$a$ : 航路側端条件を表わすパラメータ	$r$ : 変針避航時の回転半径
$B$ : 船 幅	$R$ : 操船者が抱く衝突危険度
$D$ : 衝突直径	$R_{max}$ : 許容最大衝突危険度
$f_l(l)$ : 避航開始距離分布	$R_{min}$ : 許容最小衝突危険度
$G$ : 横切り関係において義務船を示す添字	$S$ : 横切り関係において保持船を示す添字
$GT$ : 船舶の総トン数	$T$ : 被追い越しを示す添字
$H$ : 行き合いを示す添字	$T'$ : 無次元化された追従性指数
$k$ : 着目船を示す添字	$V$ : 船舶の航行速度
$k'$ : 相手船を示す添字	$W$ : 航路幅
$K'$ : 無次元化された旋回性指数	$x$ : 航路幅方向の航行位置を示す座標
$l$ : 避航開始距離	$y$ : 航路長手方向の航行位置を示す座標
$l^*$ : 限界避航開始距離	$\delta$ : 変針時の舵角
$L$ : 船舶長	$\theta$ : 変針角
$L_c$ : 航路長	$\lambda$ : 方向別交通量比
$L_{kk'}$ : 出会い 2 船の航路幅方向相対距離	$\mu_\omega$ : 船型構成分布の対数平均
$n$ : 着目船が出会い状態となる船舶数	$\sigma_\omega$ : 船型構成分布の対数標準偏差
$O$ : 追い越しを示す添字	$\varphi$ : 航行船舶の方位角
$P_C$ : 1 隻トリップ当たり船舶衝突確率	$\phi$ : 航路交差部における交差角
$P_{CENC}$ : 相手船に対する避航失敗確率	$\phi_u(u)$ : 同航時側方航過距離分布の $p. d. f.$
$P_e$ : 基本衝突確率	$\phi_x(x)$ : 航路幅方向の航行位置分布の $p. d. f.$
$P_{ENC}$ : 2 船の出会い確率	$\phi_\varphi(\varphi)$ : 方位角分布の $p. d. f.$
$P_f$ : 橋脚に対する避航失敗確率	$\phi_\omega(\omega)$ : 船型構成分布の $p. d. f.$
$Q$ : 時間交通量	$\omega$ : 対数船舶長